



TUGAS AKHIR - TE 141599

SISTEM AUTENTIKASI BIOMETRIK BERBASIS FITUR SPEKTRUM SINYAL ELEKTROENSEFALOGRAFI

Jeff L Gaol
NRP 07111440000080

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Ir. Tasripan, M.T.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**SISTEM AUTENTIKASI BIOMETRIK BERBASIS FITUR
SPEKTRUM SINYAL ELEKTROENSEFALOGRAFI**

Jeff L Gaol
NRP 07111440000080

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Ir. Tasripan, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

***BIOMETRIC AUTHENTICATION SYSTEM BASED ON
ELECTROENCEPHALOGRAPHY SIGNAL SPECTRUM
FEATURE***

Jeff L Gaol
NRP 07111440000080

Supervisor
Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Ir. Tasripan, M.T.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Sistem Autentikasi Biometrik Berbasis Fitur Spektrum Sinyal Elektroensefalografi” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



Jeff L Gaol

NRP. 07111440000080

Halaman ini sengaja dikosongkan

**SISTEM AUTENTIKASI BIOMETRIK BERBASIS
FITUR SPEKTRUM SINYAL
ELEKTROENSEFALOGRAFI
TUGAS AKHIR**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Elektronika
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
NIP. 196904261994031003

Dosen Pembimbing II



Ir. Tasripan, M.T.
NIP. 196204181990031004



JULI, 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

Sistem autentikasi terkini umumnya memiliki kelemahan, antara lain kehilangan kartu dan kunci, dan rentannya keamanan saat memasukkan kata sandi dan *Personal Identification Number*. Sistem autentikasi biometrik, seperti sidik jari dan retina, juga memiliki kelemahan, yaitu dapat ditiru oleh penipu. Pada penelitian ini, akan digunakan fitur sinyal elektroensefalografi (EEG) sebagai sebuah modalitas baru dalam autentikasi biometrik, karena sifatnya yang tidak sadar dan tidak dapat diimitasi dengan artefak yang bukan organisme hidup. Konfigurasi elektroda yang digunakan adalah dengan Fp2 untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan A2 untuk *common-mode*. Elektroda yang digunakan adalah elektroda Ag/AgCl sekali pakai. Perangkat keras instrumentasi sinyal EEG terdiri dari filter *radio frequency interference*, rangkaian proteksi, penguat instrumentasi, rangkaian *common-mode rejection*, rangkaian penghilang tegangan DC diferensial, rangkaian penguat tak membalik, *low-pass filter* dengan frekuensi *cut-off* 72Hz, *high-pass filter* dengan frekuensi *cut-off* 0,23Hz, *notch filter* dengan frekuensi resonansi 50Hz, rangkaian isolasi, *adder*, dan dikonversi ke digital dengan ADS1115. Total penguatan yang diberikan oleh rangkaian ini adalah 30.375,62x. Sinyal digital kemudian dikirim ke Arduino Nano dan diproses menggunakan *Personal Computer* untuk pengolahan sinyal EEG. Sinyal EEG kemudian difilter secara digital dengan filter Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* 4-14Hz, diberi *window* Hamming, dianalisis spektrum frekuensinya menggunakan *Fast Fourier Transform*, dikelompokkan dalam 128 bin, dan dinormalisasi. Fitur disimpan menggunakan Microsoft SQL Server dan dikenali oleh Jaringan Syaraf Tiruan. Persentase keberhasilan verifikasi sistem ini mencapai 96% untuk autentikasi lima subyek. Pembelajaran mesin kemudian diintegrasikan dengan program antar-muka *real-time*, dan didapati persentase keberhasilan verifikasi sebesar 80%.

Kata kunci: biometrik, EEG, Jaringan Syaraf Tiruan, sinyal alfa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

Current authentication systems generally have weaknesses, including card and key losses, and security vulnerabilities when entering passwords and Personal Identification Numbers. Biometric authentication systems, such as fingerprints and retinas, also have disadvantages, which can be imitated by fraudsters. In this research, we used the electroencephalography signal feature (EEG) as a new modality in biometric authentication, because it is unconscious and cannot be imitated with artifacts that are not living organisms. The electrode configuration is Fp2 for input signal, A1 for reference, and A2 for common-mode. The electrode is a disposable Ag/AgCl electrode. EEG signal instrumentation hardware consists of radio frequency interference filter, protection circuit, instrumentation amplifier, common-mode rejection circuit, DC differential circuit remover, non-inverting amplifier circuit, low pass filter with 72Hz cut-off frequency, high-pass filter with cut-off frequency of 0.23Hz, notch filter with 50Hz resonance frequency, isolation circuit, adder, and converted to digital with ADS1115. The total gain given by this circuit is 30.375,62x. Digital signals are then sent to Arduino Nano and processed using Personal Computer for processing EEG signals. The EEG signal is digitally filtered with a 3d Butterworth filter with a cut-off frequency of 4-14Hz, given a Hamming window, analyzed its frequency spectrum using Fast Fourier Transform, grouped in 128 bin, and normalized. Features are stored using Microsoft SQL Server and recognized by Artificial Neural Networks. The percentage of system verification success reached 96% for the authentication of five subjects. Machine learning was then integrated with real-time interface programs and found a verification success rate of 80%.

Keywords: alpha signals, artificial neural networks, biometrics, EEG.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah atas segala penyertaan dan petunjuk-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul:

Sistem Autentikasi Biometrik berbasis Fitur Spektrum Sinyal Elektroensefalografi

Penelitian ini dibuat untuk memenuhi kurikulum di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Strata-I.

Selama pelaksanaan penelitian ini, penulis telah mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan kepada:

- Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T. dan Ir. Tasripan, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dalam penelitian ini.
- Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc, Dr.Eng. Ir. Totok Mujiono, M.Ikom, Dr. Astria Nur Irfansyah, S.T., M.Eng., dan Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D., sebagai dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran.
- Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro, khususnya Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D.
- Seluruh dosen Departemen Teknik Biomedik, khususnya Muhammad Hilman Fatoni, S.T., M.T.
- Rekan-rekan Laboratorium B402 Elektronika Industri yang membantu dalam penelitian ini.

Penulis juga terbuka terhadap saran dan kritik dari pembaca dengan harapan adanya pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian yang telah dilakukan. Semoga laporan penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| ABSTRAK..... | i |
| ABSTRACT..... | iii |
| KATA PENGANTAR..... | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR TABEL..... | xv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5. Metodologi Penelitian..... | 3 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 4 |
| 1.7. Relevansi..... | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1. Biometrik..... | 5 |
| 2.2. Elektroensefalografi..... | 7 |
| 2.3. Perekaman Sinyal EEG..... | 10 |
| 2.4. Instrumentasi EEG..... | 12 |
| 2.4.1. Rangkaian Filter RFI..... | 12 |
| 2.4.2. Rangkaian Proteksi..... | 13 |
| 2.4.3. Penguat Instrumentasi..... | 13 |
| 2.4.4. Rangkaian <i>Common-mode Rejection</i> | 15 |
| 2.4.5. Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial..... | 16 |
| 2.4.6. Rangkaian Penguat tak Membalik..... | 17 |
| 2.4.7. Rangkaian Filter Analog..... | 18 |
| 2.4.7.1 <i>Low-pass Filter</i> | 18 |
| 2.4.7.2 <i>High-pass Filter</i> | 21 |
| 2.4.7.3 <i>Notch Filter</i> | 24 |
| 2.4.8. Rangkaian Isolasi..... | 24 |
| 2.4.1. Rangkaian <i>Adder</i> | 25 |
| 2.5. IC ADS1115..... | 27 |
| 2.6. Arduino Nano..... | 27 |
| 2.7. IC ICL7660..... | 28 |
| 2.8. Transformator..... | 29 |
| 2.9. Filter Digital..... | 30 |
| 2.9.1 <i>Low-pass Filter</i> Digital..... | 31 |

| | | |
|------------------------------------|---|----|
| 2.9.2 | <i>High-pass Filter Digital</i> | 32 |
| 2.10. | Transformasi Fourier | 34 |
| 2.11. | Pembelajaran Mesin | 38 |
| 2.12. | .NET | 43 |
| 2.13. | Basis Data SQL | 44 |
| 2.14. | Binning | 45 |
| 2.15. | Korelasi Silang | 45 |
| BAB III PERANCANGAN SISTEM..... | | 47 |
| 3.1. | Diagram Blok Sistem | 48 |
| 3.2. | Perancangan Perangkat Keras | 52 |
| 3.2.1. | Rangkaian Filter <i>Radio Frequency Interference</i> | 52 |
| 3.2.2. | Rangkaian Proteksi | 53 |
| 3.2.3. | Rangkaian Penguat Instrumentasi | 53 |
| 3.2.4. | Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial | 54 |
| 3.2.5. | Rangkaian <i>Common-mode Rejection</i> | 54 |
| 3.2.6. | Rangkaian Penguat Tak Membalik | 55 |
| 3.2.7. | Rangkaian <i>Low-pass Filter</i> | 56 |
| 3.2.8. | Rangkaian <i>High-pass Filter</i> | 57 |
| 3.2.9. | Rangkaian Penguat Variabel | 57 |
| 3.2.10. | Rangkaian <i>Notch Filter</i> | 58 |
| 3.2.11. | Rangkaian Isolasi | 58 |
| 3.2.12. | Rangkaian <i>Adder</i> | 59 |
| 3.2.13. | Rangkaian Suplai Daya | 60 |
| 3.3. | Perancangan Perangkat Lunak | 61 |
| 3.3.1. | Arduino | 61 |
| 3.3.2. | SerialPort | 61 |
| 3.3.3. | Filter Digital | 61 |
| 3.3.4. | <i>Window</i> | 63 |
| 3.3.5. | <i>Fast Fourier Transform</i> | 63 |
| 3.3.6. | <i>Data-binning</i> dan Normalisasi | 63 |
| 3.3.7. | Pembelajaran Mesin | 63 |
| 3.3.8. | Basis Data | 64 |
| 3.3.9. | Desain Program Antar-muka | 64 |
| 3.4. | Subyek dan Prosedur perekaman Sinyal EEG | 66 |
| 3.4.1 | Subyek | 66 |
| 3.4.2 | Prosedur Perekaman Sinyal EEG | 66 |
| BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS..... | | 69 |
| 4.1. | Pengujian Perangkat Keras..... | 69 |
| 4.1.1. | Pengujian Rangkaian Filter <i>Radio Frequency Interference</i> .. | 70 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1.2. | Pengujian Rangkaian Proteksi..... | 71 |
| 4.1.3. | Pengujian Rangkaian Penguat Instrumentasi | 71 |
| 4.1.4. | Pengujian Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial | 73 |
| 4.1.5. | Pengujian Rangkaian <i>Common-mode Rejection</i> | 76 |
| 4.1.6. | Pengujian Rangkaian Penguat Tak Membalik | 76 |
| 4.1.7. | Pengujian Rangkaian <i>Low-pass Filter</i> | 77 |
| 4.1.8. | Pengujian Rangkaian <i>High-pass Filter</i> | 79 |
| 4.1.9. | Pengujian Rangkaian Penguat Variabel..... | 80 |
| 4.1.10. | Pengujian Rangkaian <i>Notch Filter</i> | 81 |
| 4.1.11. | Pengujian Rangkaian Isolasi | 83 |
| 4.1.12. | Pengujian Rangkaian <i>Adder</i> | 84 |
| 4.1.13. | Penentuan Penguatan Total | 86 |
| 4.1.14. | Pengujian Rangkaian Suplai Daya | 87 |
| 4.2. | Pengujian Perangkat Lunak | 87 |
| 4.2.1. | Pengujian SerialPort..... | 87 |
| 4.2.2. | Pengujian Filter Digital..... | 90 |
| 4.2.3. | Pengujian <i>Window</i> | 90 |
| 4.2.4. | Pengujian <i>Fast Fourier Transform</i> | 91 |
| 4.2.5. | Pengujian <i>Data-binning</i> dan Normalisasi | 91 |
| 4.2.6. | Pengujian Basis Data | 92 |
| 4.3. | Analisis Konfigurasi Pemasangan Elektroda..... | 93 |
| 4.4. | Analisis Properti Sinyal Alfa | 94 |
| 4.5. | Analisis Pembelajaran Mesin | 97 |
| 4.6. | Implementasi Program Antar-muka dengan Pembelajaran Mesin Terpilih..... | 99 |
| | BAB V PENUTUP..... | 101 |
| 5.1. | Kesimpulan..... | 101 |
| 5.2. | Saran | 101 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 103 |
| | LAMPIRAN A | 107 |
| | LAMPIRAN B | 123 |
| | LAMPIRAN C | 127 |
| | LAMPIRAN D | 133 |
| | LAMPIRAN E | 149 |
| | BIODATA PENULIS | 157 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Struktur dari neuron | 7 |
| Gambar 2.2 | Empat ritme normal otak dominan, dari frekuensi tertinggi hingga terendah | 9 |
| Gambar 2.3 | Nomenklatur sistem perekaman EEG 10-20..... | 11 |
| Gambar 2.4 | Rangkaian sederhana untuk rangkaian filter RFI..... | 12 |
| Gambar 2.5 | Diagram rangkaian dari penguat instrumentasi tiga penguat operasional | 13 |
| Gambar 2.6 | (a) Struktur rangkaian dari INA128, (b) Rangkaian <i>common-mode rejection</i> | 15 |
| Gambar 2.7 | Penguat beda dengan <i>Low-pass filter</i> (LPF) dan <i>stage</i> penguat | 17 |
| Gambar 2.8 | Rangkaian penguat tak membalik dengan LPF..... | 18 |
| Gambar 2.9 | LPF Sallen-Key orde dua penguatan satu. | 19 |
| Gambar 2.10 | HPF Sallen-Key orde dua penguatan satu. | 21 |
| Gambar 2.11 | <i>Twin T network notch filter</i> | 24 |
| Gambar 2.12. | Rangkaian isolasi. | 25 |
| Gambar 2.13 | Rangkaian <i>adder</i> | 26 |
| Gambar 2.14 | Blok diagram sederhana dari ADS1115. | 27 |
| Gambar 2.15 | Perangkat Arduino Nano..... | 28 |
| Gambar 2.16 | Konfigurasi tegangan negatif dasar..... | 29 |
| Gambar 2.17 | Skematik representasi dari transformator | 29 |
| Gambar 2.18 | Lilitan sekunder <i>center-tapped</i> | 30 |
| Gambar 2.19 | Diagram alir desain filter Butterworth digital dari filter analog..... | 30 |
| Gambar 2.20 | Ilustrasi keluarga <i>Fourier Transform</i> | 34 |
| Gambar 2.21 | Diagram alur dari FFT | 36 |
| Gambar 2.22 | Dekomposisi FFT | 37 |
| Gambar 2.23 | Operasi <i>Butterfly</i> | 37 |
| Gambar 2.24 | (a) FFT ideal, (b) FFT dengan <i>leakage</i> | 38 |
| Gambar 2.25 | Sebuah neuron biologis..... | 41 |
| Gambar 2.26 | Arsitektur ANN..... | 43 |
| Gambar 3.1 | Diagram blok alur sistem autentikasi..... | 47 |
| Gambar 3.2 | Diagram blok perangkat keras EEG | 48 |
| Gambar 3.3 | Diagram blok perangkat lunak EEG | 51 |
| Gambar 3.4 | Filter RFI | 52 |
| Gambar 3.5 | Rangkaian proteksi | 53 |
| Gambar 3.6 | Penguat instrumentasi | 53 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 3.7 | Rangkaian penghilang tegangan DC diferensial..... | 54 |
| Gambar 3.8 | Rangkaian CMR..... | 55 |
| Gambar 3.9 | Rangkaian penguat tak membalik | 55 |
| Gambar 3.10 | Rangkaian LPF orde 2 | 56 |
| Gambar 3.11 | Rangkaian HPF orde 2 | 56 |
| Gambar 3.12 | Rangkaian penguat variabel | 57 |
| Gambar 3.13 | Rangkaian <i>notch filter</i> | 58 |
| Gambar 3.14 | Rangkaian isolasi..... | 59 |
| Gambar 3.15 | Rangkaian <i>adder</i> | 60 |
| Gambar 3.16 | Rangkaian suplai daya A | 60 |
| Gambar 3.17 | Rangkaian suplai daya B | 61 |
| Gambar 3.18 | Diagram alur desain antar-muka sistem | 65 |
| Gambar 3.19 | Konfigurasi Oz untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan Fpz untuk <i>common-mode</i> | 67 |
| Gambar 3.20 | Konfigurasi Fp2 untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan A2 untuk <i>common-mode</i> | 67 |
| Gambar 4.1 | Perangkat keras sistem autentikasi | 69 |
| Gambar 4.2 | Citra osiloskop dalam pengujian rangkaian filter RFI.. | 70 |
| Gambar 4.3 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada filter RFI.. | 70 |
| Gambar 4.4 | Citra osiloskop dalam pengujian rangkaian proteksi.... | 71 |
| Gambar 4.5 | Citra osiloskop dalam pengujian penguat instrumentasi | 72 |
| Gambar 4.6 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penghilang tegangan DC diferensial | 73 |
| Gambar 4.7 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian CMR | 75 |
| Gambar 4.8 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada CMR | 75 |
| Gambar 4.9 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penguat tak membalik | 76 |
| Gambar 4.10 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada penguat tak membalik | 77 |
| Gambar 4.11 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian LPF | 78 |
| Gambar 4.12 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada LPF | 78 |
| Gambar 4.13 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian HPF | 79 |
| Gambar 4.14 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada HPF..... | 79 |
| Gambar 4.15 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penguat variabel..... | 80 |
| Gambar 4.16 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian <i>notch filter</i> ... | 82 |
| Gambar 4.17 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada <i>notch filter</i> | 82 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.18 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian isolasi | 83 |
| Gambar 4.19 | Relasi antara frekuensi dan penguatan pada isolasi | 84 |
| Gambar 4.20 | Citra osiloskop saat pengujian rangkaian <i>adder</i> | 85 |
| Gambar 4.21 | Plot sinyal hasil penggunaan penguatan total realita ... | 86 |
| Gambar 4.22 | Tampilan awal perangkat lunak | 87 |
| Gambar 4.23 | (a) Tampilan laman Port COM saat perangkat keras elektroensefalografi dihubungkan dengan PC, (b) Pengujian perangkat keras elektroensefalografi dihubungkan dengan PC | 88 |
| Gambar 4.24 | (a) Tampilan laman Port COM saat Samsung Galaxy A520 dihubungkan dengan PC, (b) Pengujian Samsung Galaxy A520 dihubungkan dengan PC | 89 |
| Gambar 4.25 | Sinyal EEG yang telah difilter digital | 90 |
| Gambar 4.26 | Spektrum sinyal EEG yang telah difilter secara digital | 90 |
| Gambar 4.27 | Sinyal EEG yang telah diberi <i>window</i> | 91 |
| Gambar 4.28 | Spektrum sinyal EEG yang telah diberi <i>window</i> | 91 |
| Gambar 4.29 | Spektrum sinyal uji | 91 |
| Gambar 4.30 | Spektrum frekuensi yang dikelompokkan ke dalam bin | 92 |
| Gambar 4.31 | Laman Panel Administrator sesudah sekuens registrasi | 92 |
| Gambar 4.32 | Spektrum frekuensi sinyal dengan elektroda Ag/AgCl <i>reusable</i> | 93 |
| Gambar 4.33 | Spektrum frekuensi sinyal dengan elektroda Ag/AgCl <i>disposable</i> | 93 |
| Gambar 4.34 | Spektrum frekuensi untuk akuisisi beda waktu | 94 |
| Gambar 4.35 | Sampel sinyal EEG subyek A | 95 |
| Gambar 4.36 | Sampel sinyal EEG subyek B | 95 |
| Gambar 4.37 | Sampel sinyal EEG subyek C | 95 |
| Gambar 4.38 | Sampel sinyal EEG subyek D | 95 |
| Gambar 4.39 | Sampel sinyal EEG subyek E | 96 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 4.1 | Pengujian rangkaian filter RFI..... | 71 |
| Tabel 4.2 | Pengujian rangkaian proteksi..... | 72 |
| Tabel 4.3 | Pengujian rangkaian penguat instrumentasi..... | 73 |
| Tabel 4.4 | Pengujian rangkaian penghilang tegangan DC diferensial | 74 |
| Tabel 4.5 | Pengujian rangkaian CMR..... | 75 |
| Tabel 4.6 | Pengujian rangkaian penguat tak membalik | 77 |
| Tabel 4.7 | Pengujian rangkaian LPF..... | 78 |
| Tabel 4.8 | Pengujian rangkaian HPF | 80 |
| Tabel 4.9 | Pengujian rangkaian penguat variabel | 81 |
| Tabel 4.10 | Pengujian rangkaian <i>notch filter</i> | 83 |
| Tabel 4.11 | Pengujian rangkaian isolasi | 84 |
| Tabel 4.12 | Pengujian rangkaian <i>adder</i> | 85 |
| Tabel 4.13 | Penentuan penguatan total | 86 |
| Tabel 4.14 | Pengujian rangkaian suplai daya..... | 86 |
| Tabel 4.15 | Nilai korelasi silang untuk akuisisi beda waktu | 94 |
| Tabel 4.16 | Rata-rata korelasi silang intra-kelas untuk lima subyek..... | 96 |
| Tabel 4.17 | Rata-rata korelasi silang inter-kelas untuk lima subyek..... | 96 |
| Tabel 4.18 | Analisis persentase verifikasi untuk 1.024 bin..... | 97 |
| Tabel 4.19 | Analisis persentase verifikasi untuk 128 bin..... | 98 |
| Tabel 4.20 | Analisis persentase verifikasi untuk 64 bin..... | 98 |
| Tabel 4.21 | Pengujian program antar-muka dengan pembelajaran mesin terpilih | 99 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berbagai sistem penyandian konvensional telah diciptakan untuk meningkatkan sistem keamanan, baik untuk mengamankan rumah, bank, laboratorium, dan lain-lain. Contoh sistem penyandian konvensional adalah menggunakan kata sandi, *Personal Identification Number* (PIN), kartu, dan kunci. Kelemahan sistem konvensional ini adalah mudahnya kehilangan kartu dan kunci, dan rentannya keamanan saat memasukkan kata sandi dan PIN [1]. Terdapat pula sistem penyandian biometrik yang menggunakan sidik jari atau bahkan retina sebagai modalitas lainnya. Namun, tidak semua orang memiliki sidik jari dan retina, sehingga menyebabkan permasalahan pada aspek universalitas sebagai sebuah fitur biometrik. Fitur biometrik tersebut juga memiliki kelemahan, yaitu dapat ditiru oleh penipu mengingat fitur ini terekspos pada tubuh [2].

Kami menyadari bahwa sistem penyandian terkini kurang aman mengingat berbagai alasan yang telah disebutkan. Oleh karena itu, sistem penyandian perlu diperbaharui untuk meningkatkan keamanan. Kami berharap adanya sistem penyandian terbaru dapat melengkapi sistem penyandian terkini.

Solusi yang ditawarkan untuk pembaharuan sistem penyandian adalah sistem penyandian biometrik berbasis elektroensefalografi (EEG) alias menggunakan sinyal otak. Sinyal EEG ini mampu mengatasi permasalahan hilangnya alat keamanan seperti kartu dan kunci. Selain itu, EEG juga aman dari *shoulder-surfing* dan juga selalu hadir selama manusia itu hidup, sehingga EEG memiliki fungsi terhadap deteksi hidupnya seseorang [1]. Sebagai tambahan, EEG juga tidak terekspos pada permukaan tubuh [2]. Oleh karena itu, EEG merupakan salah satu sistem penyandian biometrik yang sangat efektif untuk mengatasi permasalahan sistem penyandian terkini.

Namun, pendekatan konvensional untuk aplikasi sinyal EEG terkini sebagai modalitas autentikasi biometrik adalah tidak efektif, karena membutuhkan sekali banyak elektroda sebagai sensor dan durasi pengukuran yang lama [1]. Pemasangan banyak elektroda untuk melakukan akuisisi sinyal EEG membuat pengguna tidak nyaman, sehingga pada penelitian ini akan digunakan sensor tunggal untuk melakukan akuisisi sinyal EEG.

Untuk meningkatkan kenyamanan pengguna, maka digunakan pengukuran waktu jangka pendek menggunakan satu *lead* untuk akuisisi sinyal EEG. Ekstraksi fitur dari sinyal EEG akan dilakukan menggunakan *Fast Fourier Transform*, sehingga dihasilkan fungsi frekuensi dari sinyal. Untuk melakukan identifikasi pengguna, akan digunakan pembelajaran mesin.

Pada penelitian ini, digunakan spektrum dari gelombang alfa sebagai fitur. Gelombang alfa akan terdeteksi ketika pengguna menutup mata dan relaks. Penggunaan gelombang alfa sebagai fitur autentikasi memiliki keuntungan, karena pengguna tidak perlu melakukan apa pun untuk melakukan autentikasi alias merupakan autentikasi tidak sadar.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang perangkat keras untuk mengakuisisi sinyal elektroensefalografi (EEG).
2. Penentuan konfigurasi elektroda yang tepat pada kepala untuk memperoleh sinyal alfa sebagai fitur sistem autentikasi biometrik.
3. Pemilihan metode yang tepat dalam pengolahan sinyal agar sinyal EEG dapat menjadi fitur sistem autentikasi biometrik.
4. Merancang perangkat lunak yang mengimplementasikan metode pengolahan EEG terpilih.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Menghasilkan perangkat keras instrumentasi satu sadapan untuk mengakuisisi sinyal elektroensefalografi (EEG) berbasis Arduino Nano.
2. Menemukan konfigurasi elektroda yang tepat pada kepala untuk memperoleh sinyal alfa sebagai fitur sistem autentikasi biometrik.
3. Mengetahui metode yang tepat dalam pengolahan sinyal agar sinyal EEG dapat menjadi fitur sistem autentikasi biometrik.
4. Menciptakan sebuah program antar-muka yang dapat mengimplementasikan metode pengolahan sinyal EEG terpilih dengan lingkungan .NET.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Subyek berusia 18-22 tahun.
2. Subyek tidak memiliki gangguan otot mata.
3. Selama proses perekaman, subyek memejamkan mata dalam kondisi relaks.
4. Informasi sinyal elektroensefalografi yang digunakan sebagai fitur autentikasi biometrik adalah sinyal alfa.

1.5. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

Studi literatur berisi serangkaian hasil pengumpulan dan pengkajian dasar teori yang relevan dan terpercaya untuk menunjang realisasi tugas akhir ini. Literatur yang digunakan bersumber dari *paper*, jurnal, artikel, buku, dan sumber-sumber terpercaya lainnya.

2. Perancangan sistem

Tahap perancangan ini meliputi perancangan sistem autentikasi secara keseluruhan. Terdapat dua bagian utama dalam sistem ini: perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras dirancang untuk mengakuisisi sinyal elektroensefalografi (EEG) dan perangkat lunak digunakan untuk pengolahan sinyal EEG, pembelajaran mesin, dan olah basis data.

3. Pengujian sistem

Dalam tahap ini, akan dilakukan pengujian apakah sistem perangkat keras dan perangkat lunak yang dibuat dapat bekerja sesuai ekspektasi. Pengujian sistem dilakukan secara keseluruhan melibatkan pengujian terhadap perangkat keras dan perangkat lunak.

4. Analisis data

Dengan menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak yang teruji, dapat dilakukan analisis konfigurasi pemasangan elektroda yang akan digunakan, properti sinyal alfa yang mendukung sebagai fitur autentikasi biometrik, dan pembelajaran mesin yang optimum untuk melakukan autentikasi.

5. Implementasi sistem

Setelah melakukan studi analisis pada poin 4, maka akan dilakukan pengimplementasian sistem terpilih sebagai program antar-muka yang dapat digunakan secara *real-time*.

6. Penulisan laporan tugas akhir

Penulisan laporan tugas akhir merupakan tahap akhir dari proses pengerjaan tugas akhir ini yang merupakan hasil akhir dan kesimpulan dari pembuatan dan pengujian sistem secara keseluruhan. Kesimpulan menjadi jawaban akan permasalahan yang dianalisis, sedangkan saran yang diberikan dapat menjadi masukan untuk pengembangan lebih lanjut.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem yang dibuat terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

- Bab I: Pendahuluan
Bab ini meliputi penjelasan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab II: Tinjauan Pustaka
Bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang terkait dalam pengerjaan tugas akhir ini.
- Bab III: Perancangan Sistem
Bab ini menjelaskan tentang perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dalam realisasi tugas akhir.
- Bab IV: Pengujian dan Analisis
Bab ini menjelaskan mengenai hasil pengujian dari sistem yang telah dirancang baik secara independen maupun secara keseluruhan.
- Bab V: Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan tugas akhir, serta saran untuk pengembangannya.

1.7. Relevansi

Autentikasi biometrik berbasis sinyal elektroensefalografi merupakan sebuah inovasi yang masih baru dan dapat digunakan untuk memperkaya modalitas dalam sistem keamanan. Hal ini mengingat bahwa sistem keamanan terkini memiliki banyak kelemahan [3]: rentan serangan klien, serangan *host*, *eavesdropping*, repudiasi, serangan trojan kuda, dan pengelakan layanan. Hanya dengan menggunakan sinyal EEG, pengguna dapat mengatasi semua permasalahan dalam sistem keamanan terkini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biometrik

Biometrik adalah ilmu yang berhubungan dengan identitas dari individu berdasarkan atribut fisik, kimia, atau kelakuan dari seseorang [3]. Biometrik sangat relevan untuk sistem manajemen identitas dengan skala yang sangat besar yang fungsionalitasnya bergantung pada determinasi akurat dari identitas individu. Contoh dari aplikasinya adalah untuk pengamanan gudang senjata yang menggunakan sidik jari sebagai salah satu modalitas pengamanannya [4].

Hal yang paling penting dalam sistem manajemen identitas adalah determinasi atau verifikasi dari identitas individu. Hal ini berguna untuk membedakan identitas yang berada di data dengan identitas penipu. Terdapat banyak sekali jenis biometrik yang telah diperkenalkan dan telah digunakan untuk berbagai aplikasi autentikasi. Setiap biometrik dievaluasi ke dalam tujuh faktor [5]:

- universalitas: setiap individu yang menggunakan aplikasi harus memiliki modalitas;
- keunikan: modalitas yang diberikan harus cukup berbeda dibandingkan individu lain;
- tingkat permanen: modalitas biometrik dari individu harus cukup invarian terhadap sebuah periode waktu dengan respek terhadap algoritma *matching*. Sebuah modalitas yang berubah signifikan terhadap waktu tidak berguna untuk dapat digunakan sebagai biometrik;
- pengukuran: dapat mengakuisisi dan digitalisasi modalitas biometrik menggunakan perangkat yang cocok yang tidak menyebabkan ketidaknyamanan yang tidak semestinya pada individu. Selanjutnya, data mentah yang diperoleh harus dapat diproses agar dapat mengekstrak set fitur yang representatif;
- performa: akurasi rekognisi dan sumber daya yang dibutuhkan untuk mencapai akurasi tersebut harus memenuhi batasan yang dikenakan pada aplikasi;
- akseptabilitas: individu pada populasi target yang akan memanfaatkan aplikasi harus bersedia untuk menyajikan sifat biometrik mereka ke dalam sistem; dan

- *circumvention*: bagian ini mengacu pada kemudahan sifat seseorang dapat ditiru menggunakan artefak (contoh: jari palsu), dalam kasus ciri fisik, dan mimikri, dalam hal sifat perilaku.

Contoh metode tradisional (non-biometrik) untuk mengenal identitas seseorang adalah kata sandi yang berbasis pengetahuan individu, kartu tanda pengenal berbasis mekanisme token. Akan tetapi, representasi identitas ini mudah hilang, dibagi, dimanipulasi, atau bahkan berkompromi dengan keamanan yang diinginkan. Berbeda dengan biometrik yang menawarkan solusi yang natural dan andal terhadap aspek tertentu dari manajemen identitas dengan menggunakan skema otomasi penuh atau semi-otomasi untuk mengenal individu berdasarkan karakteristik biologis [6].

Tingkat efektif dari sebuah autentikator adalah berdasarkan relevansinya terhadap aplikasi tertentu sebagaimana tingkat *robust* terhadap berbagai jenis serangan [3]. Berikut adalah daftar dari serangan yang dapat diluncurkan melawan sistem autentikasi berbasis kata sandi dan token: (a) serangan klien (contoh: menebak kata sandi, mencuri token), (b) serangan *host* (contoh: mengakses dokumen teks yang mengandung kata sandi), (c) *eavesdropping* atau menguping (contoh: *shoulder-surfing* untuk kata sandi), (d) repudiasi (contoh: melakukan klaim bahwa token telah salah diletakkan), (e) serangan trojan kuda (contoh: instalasi *bogus log-in screen* untuk mencuri kata sandi), dan (f) pengelakan layanan (contoh: melumpuhkan sistem dengan melakukan suplai kata sandi yang tidak benar setelah beberapa waktu) [7].

Hal ini berbeda dengan biometrik yang menawarkan berbagai keuntungan seperti rekognisi negatif dan non-repudiasi yang tidak ditawarkan oleh kata sandi dan token [8]. Rekognisi negatif adalah proses ketika sistem menentukan bahwa individu tertentu memang terdaftar dalam sistem meskipun individu mungkin menyangkalnya. Hal ini sangat penting untuk *welfare disbursement* ketika seorang penipu dapat mencoba untuk mengklaim beberapa manfaat (contoh: *double dipping*) dengan menggunakan beberapa nama. Non-repudiasi adalah cara untuk menjamin seseorang yang mengakses fasilitas tertentu tidak dapat menyangkal bahwa dia telah menggunakannya (contoh: seseorang mengakses sumber daya komputer tertentu dan mengklaim bahwa seorang penipu telah menggunakannya di bawah kredensial yang telah dipalsukan).

Biometrik yang telah umum digunakan adalah sidik jari, iris, retina,

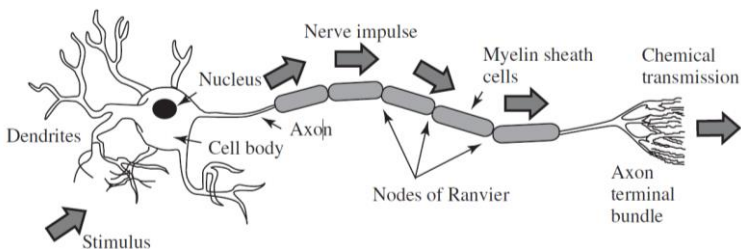
pembuluh, geometri tangan/jari, tanda tangan, *palmprint*, *voice pattern*, telinga, dan lain-lain [3]. Akan tetapi, biometrik tersebut tidak cocok untuk verifikasi kontinu mengingat mereka membutuhkan presentasi sadar dari data biometrik [1]. Selain itu, diketahui bahwa sidik jari dapat di-*circumvention* menggunakan tangan palsu [9]. Hal ini dikarenakan sidik jari terekspos pada permukaan tubuh.

Mengacu pada *circumvention*, jenis biometrik berbasis pembuluh adalah lebih baik. Akan tetapi, terdapat laporan bahwa penggunaan pembuluh ini dapat menimbulkan artefak pada *enrollment* dan verifikasi. Hal ini dikarenakan tidak adanya deteksi benda hidup yang menguji apakah sebuah obyek tertentu adalah bagian dari tubuh. Skema deteksi benda hidup dibutuhkan untuk melindungi sistem autentikasi biometrik dari tipuan artefak [1].

2.2. Elektroensefalografi

Sebuah sinyal elektroensefalografi (EEG) adalah pengukuran dari arus yang mengalir selama eksitasi sinaptik dendrit dari banyak neuron (lihat Gambar 2.1) piramidal di korteks serebral [10]. Ketika sel otak (neuron) diaktifkan, arus sinaptik diproduksi di dalam dendrit. Arus ini menghasilkan sebuah medan magnet yang dapat diukur menggunakan mesin elektromiogram (EMG) dan sebuah medan listrik sekunder pada *scalp* yang direkam menggunakan sebuah sistem EEG.

Perbedaan antara potensial listrik ditimbulkan oleh total *graded potential* post-sinaptik dari sel piramidal yang membuat dipol elektrik antara soma (tubuh dari neuron) dan dendrit apikal, cabang dari neuron-neuron. Arus pada otak dihasilkan mayoritas dengan memompa ion positif dari sodium, Na^+ , potasium, K^+ , kalsium, Ca^{2+} , dan ion negatif dari klorin, Cl^- , melalui membran neuron pada arah yang ditentukan oleh potensial membran [11].



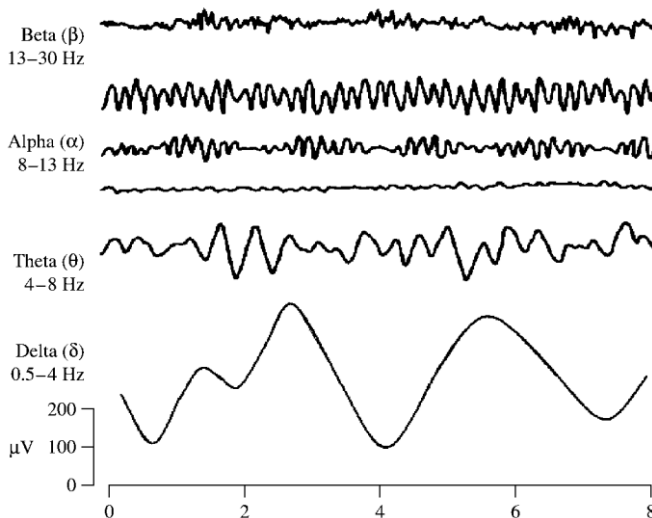
Gambar 2.1 Struktur dari neuron [10].

Kepala manusia terdiri dari layer yang berbeda-beda termasuk *scalp*, tengkorak, otak, dan banyak layer tipis lain yang berada di antaranya. Tengkorak melakukan atenuasi sinyal-sinyal sekitar seratus kali lebih banyak dibandingkan jaringan lunak. Banyak pula *noise* atau derau yang dihasilkan dari otak (derau internal) atau sekitar *scalp* (derau sistem atau derau eksternal). Oleh karena itu, hanya populasi dari neuron aktif yang dapat menghasilkan potensial yang cukup untuk dapat direkam menggunakan elektroda *scalp*.

Sinyal EEG yang telah diakuisisi dari manusia (dan juga hewan) dapat pula digunakan untuk investigasi permasalahan klinis berikut [12]:

- pemantauan kewaspadaan, koma, dan kematian otak;
- menentukan dari kerusakan termasuk cedera kepala, stroke, dan tumor;
- menguji jalur aferen (oleh *evoked potential*);
- pemantauan keterlibatan kognitif (ritme alfa);
- menghasilkan situasi *biofeedback*;
- mengontrol kedalaman anestesia (servo anestesia);
- menginvestigasi epilepsi dan menentukan lokasi asal kejang;
- menguji efek obat terhadap epilepsi;
- membantu dalam eksisi korteks eksperimental dari fokus epilepsi;
- pemantauan perkembangan otak;
- menguji obat untuk efek kejang;
- menyelidiki gangguan tidur dan fisiologi;
- menyelidiki gangguan jiwa; dan
- menyediakan sistem perekaman data hibrida bersama dengan modalitas pencitraan lainnya.

Pada dewasa yang sehat, amplitudo dan frekuensi dari sinyal EEG berubah dari kondisi satu ke kondisi lainnya, contohnya ketika tidur kemudian bangun. Karakteristik dari gelombang juga berubah seiring dengan bertambahnya umur. Terdapat lima gelombang otak mayor yang dapat dibedakan berdasarkan rentang frekuensi: delta, teta, alfa, beta, dan gamma (lihat Gambar 2.2). Gelombang alfa dan beta diperkenalkan oleh Berger pada 1929. Jasper dan Andrews (1938) menggunakan istilah 'gamma' untuk mengacu pada gelombang di atas 30Hz. Ritme delta diperkenalkan oleh Walter (1936) untuk merujuk pada frekuensi di bawah gelombang alfa. Dia juga memperkenalkan gelombang teta yang merupakan gelombang yang memiliki frekuensi 4-7,5Hz.



Gambar 2.2 Empat ritme normal otak dominan, dari frekuensi tertinggi hingga terendah [10].

Gelombang delta berada pada rentang 0,5-4Hz yang berkorelasi dengan *deep sleep* dan mungkin dapat muncul saat kondisi bangun (*waking*) [10]. Sangat mudah untuk membedakan antara sinyal artefak yang disebabkan oleh otot besar dari leher dan dagu dengan respons delta asli. Hal ini dikarenakan otot berada dekat dengan permukaan kulit dan memproduksi sinyal yang besar, sedangkan sinyal yang ingin kita amati berasal dari dalam otak dan dilemahkan ketika melewati tengkorak.

Gelombang teta berada pada rentang 4-7,5Hz [10]. Pemilihan istilah teta dimungkinkan karena asalnya yang berasal dari thalamic. Gelombang teta muncul saat kesadaran mulai menuju kantuk. Gelombang teta berasosiasi dengan akses material tak sadar, inspirasi kreatif, dan meditasi yang dalam. Gelombang teta terkadang juga muncul bersama frekuensi lainnya dan terkadang berhubungan dengan tingkat gairah.

Gelombang alfa muncul pada bagian posterior kepala dan umumnya ditemukan pada area oksipital dari otak. Gelombang ini dapat dideteksi pada semua bagian lobus posterior dari otak. Gelombang alfa memiliki frekuensi dengan rentang 8-13Hz [10]. Sinyal ini terkadang muncul dengan bentuk bulat atau sinusoidal. Gelombang alfa dapat mengindikasikan pada kesadaran santai tanpa perhatian atau konsentrasi.

Gelombang alfa adalah ritme yang sangat menonjol pada keseluruhan aktivitas otak. Beberapa subyek memproduksi gelombang alfa dengan mata tertutup, karena adanya pola menunggu atau pemindaian oleh region visual dari otak. Hal ini dapat berkurang atau dieliminasi dengan adanya tindakan membuka mata, mendengarkan suara yang tidak biasa, kegelisahan, konsentrasi mental, atau perhatian. Sebuah gelombang alfa dengan amplitudo yang tinggi terdapat pada area oksipital dan amplitudo kurang dari $50\mu\text{V}$.

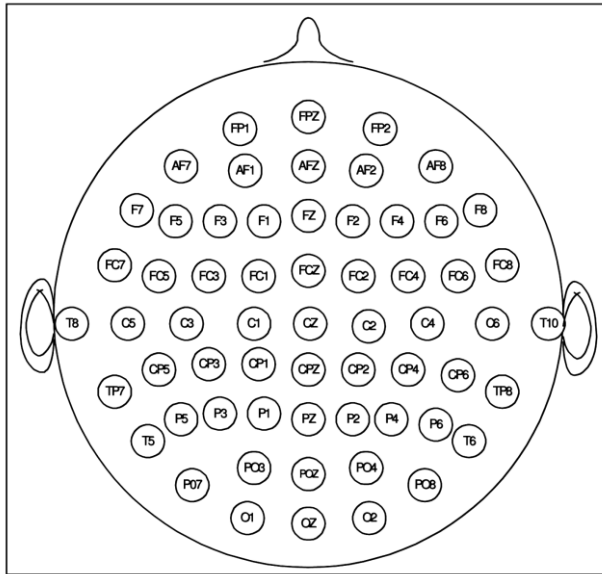
Gelombang beta berada pada rentang 14-26Hz [10]. Gelombang beta merupakan ritme bangun dari otak yang berhubungan dengan berpikir, perhatian aktif, fokus pada dunia luar, atau memecahkan masalah konkret, dan ditemukan pada dewasa normal. Sebuah gelombang beta dengan level yang tinggi dapat dimiliki manusia apabila berada pada kondisi panik. Aktivitas beta ritmis sering ditemui pada region frontal dan sentral. Ritme beta sentral berhubungan dengan ritme rolandic mu dan dapat dihambat dengan adanya aktivitas motor atau stimulasi taktil. Amplitudo ritme beta berada di bawah $30\mu\text{V}$.

Frekuensi di atas 30Hz (umumnya di atas 45Hz) disebut sebagai rentang gamma atau gelombang beta cepat. Sekalipun amplitudo ritme ini adalah rendah dan jarang, deteksi dari ritme ini sangat berguna untuk diagnosa penyakit otak tertentu.

2.3. Perekaman Sinyal EEG

Sistem perekaman elektroensefalografi (EEG) terkini terdiri dari sejumlah elektroda, seperangkat penguat beda (satu untuk tiap kanal) yang diikuti oleh filter-filter [12]. Elektroda-elektroda perekaman EEG sangat penting untuk proses akuisisi data kualitas tinggi. Terdapat beberapa jenis elektroda yang digunakan dalam sistem perekaman EEG [10], seperti sekali pakai, elektroda diska yang dapat digunakan kembali (emas, perak, besi, atau timah), pita kepala dan topi elektroda, elektroda berbasis garam, dan elektroda jarum.

Untuk perekaman multi-kanal dengan jumlah elektroda yang banyak, topi elektroda sering digunakan. Penempatan elektroda dapat dilihat pada Gambar 2.3. Umumnya elektrodanya terdiri dari diska Ag-AgCl. Jarum elektroda digunakan untuk diimplantasikan di bawah tengkorak dengan operasi invasif yang minim [10]. Elektroda dalam perekaman sinyal EEG dapat berupa *reusable* atau *disposable*.

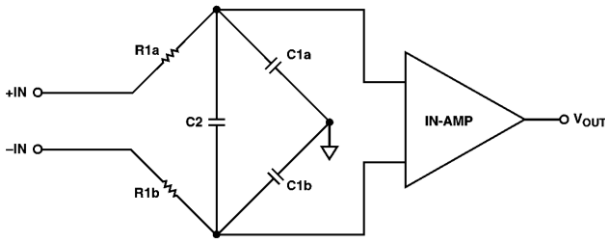


Gambar 2.3 Nomenklatur sistem perekaman EEG 10-20 [13].

International Federation of Societies for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology telah merekomendasikan pengaturan elektroda konvensional yang disebut 10-20 dengan 21 elektroda (tidak termasuk elektroda telinga). Elektroda-elektroda lubang telinga bernama A1 dan A2, lubang telinga kiri dan kanan, yang digunakan sebagai elektroda-elektroda referensi.

Terdapat dua mode perekaman, yaitu diferensial dan referensial [10]. Pada mode diferensial atau bipolar, dua masukan pada *differential amplifier* yang berasal dari dua elektroda. Pada mode referensial atau unipolar, satu atau dua elektroda referensi digunakan. Terdapat pula perekaman bebas referensi, yang menggunakan sebuah *common average reference*.

Dalam perekaman sinyal alfa, sadapan dapat dilakukan pada PO7/8, PO3/4, O1/2, POZ, dan Oz, karena memiliki tingkat sinyal alfa yang sangat tinggi [14]. Selain itu, sinyal alfa juga dapat diakuisisi pada Fp1 dan Fp2 [2], yang memiliki kelebihan yaitu tidak terganggu rambut.



Gambar 2.4 Rangkaian sederhana untuk rangkaian filter RFI [15].

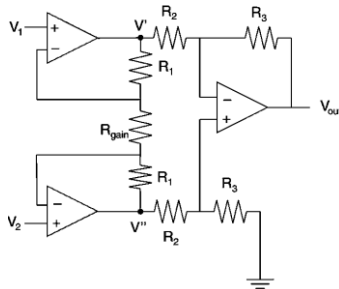
2.4. Instrumentasi EEG

Dalam melakukan pengukuran sinyal EEG, diperlukan sebuah rangkaian instrumentasi yang terdiri dari: filter *radio frequency interference* (RFI), rangkaian proteksi, penguat instrumentasi, rangkaian *common-mode rejection*, rangkaian penghilang tegangan DC diferensial, rangkaian penguat tak membalik, *low-pass filter* (LPF), *high-pass filter* (HPF), *notch filter*, rangkaian isolasi, dan *adder*. Umumnya LPF memiliki frekuensi *cut-off* 60Hz atau 70Hz dan HPF diatur pada frekuensi 0,3Hz [16].

2.4.1. Rangkaian Filter RFI

Aplikasi pada dunia nyata selalu berhubungan dengan RFI [15]. RFI dapat di-*rectified* oleh IC dan tampak seperti eror *offset* DC. RFI dapat diatasi dengan menggunakan *differential low-pass filter*. Filter ini memiliki tiga tugas: menghilangkan energi RF dari *line* masukan, mempertahankan keseimbangan sinyal AC antara tiap *line* dan *ground*, dan mempertahankan impedansi masukan yang tinggi. Rangkaian RFI membentuk rangkaian *bridge* seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Karenanya, ketidaksamaan antara konstanta waktu dari C1a/R1a dan C1b/R1b akan membuat *bridge* menjadi tidak seimbang dan mengurangi *high frequency common-mode rejection*. Oleh karena itu, resistor R1a dan R1b dan kapasitor C1a dan C1b haruslah sama. Seperti yang terlihat, C2 terhubung sepanjang keluaran *bridge*, sehingga C2 berada dalam konfigurasi paralel dengan kombinasi seri antara C1a dan C1b. Karena terhubung, C2 secara efektif mengurangi eror CMR. -3dB *differential band-width* dari filter ini adalah:

$$BW_{DIFF} = \frac{1}{2\pi R(2C2+C1)} \quad (2.1)$$



Gambar 2.5 Diagram rangkaian dari penguat instrumentasi tiga penguat operasional [17].

2.4.2. Rangkaian Proteksi

Dalam sistem akuisisi data, penguat antar-muka terkadang menerima masukan yang berlebih, contohnya seperti level tegangan yang melebihi skala penuh untuk penguatan yang sedang dipilih atau melebihi tegangan suplai [18]. Sistem harus diberikan proteksi untuk melindungi pengguna dari *electric shock* dan penguat juga harus dilindungi dari bahaya yang dapat terjadi karena tegangan masukan yang tinggi selama diberi *defibrillator* atau instrumen *electrosurgical*. Rangkaian proteksi dapat direalisasikan menggunakan dioda yang diletakkan sebelum rangkaian penguat instrumentasi.

2.4.3. Penguat Instrumentasi

Preamplifier merupakan bagian yang penting dalam sistem akuisisi EEG, karena sinyal EEG adalah lemah dan interferensi derau yang sangat kuat. *Preamplifier* harus memiliki impedansi masukan yang tinggi, *common-mode rejection ratio* (CMRR) yang tinggi, rendah derau, *nonlinearity*, kemampuan anti-interferensi yang tinggi dan performa penguat dengan rentang yang dinamis dan frekuensi yang tepat [18]. Rangkaian ini tidak hanya melakukan ekstraksi sinyal, melainkan mengurangi sinyal interferensi pada level yang paling rendah. *Preamplifier* yang dipilih adalah penguat instrumentasi. Penguat instrumentasi merupakan sebuah penguat jenis diferensial yang dapat mengeliminasi kebutuhan untuk *input impedance matching*. Penguat instrumentasi ini pada umumnya terdiri dari dua buah rangkaian, yaitu *double ended amplifier* dan penguat diferensial, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 [19].

Rangkaian dapat dianalisis menggunakan superposisi [17]. Pertama, sumber tegangan V_2 diatur menjadi nol, dan V_{out} direpresentasikan sebagai $V_{out,1}$ yang nilainya dapat diturunkan dengan persamaan untuk penguat diferensial sederhana:

$$V_{out,1} = \frac{R_3}{R_2} (V' - V'') \quad (2.2)$$

Karena terminal tak membalik dari penguat operasional bawah ada pada *ground*, nilai dari V' dapat dikalkulasi dari perhitungan untuk penguat operasional tak membalik:

$$V' = V_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_G} \right) \quad (2.3)$$

Arus sepanjang penguat operasional bawah bernilai $-V''/R_1$, dan nilainya pasti setara dengan arus sepanjang R_1 dan R_G terhadap V' :

$$\frac{-V''}{R_1} = \frac{V'}{R_1 + R_G} \quad (2.4)$$

$$V'' = -V' \frac{R_1}{R_1 + R_G} \quad (2.5)$$

Melakukan kombinasi persamaan 3 dan 5 akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

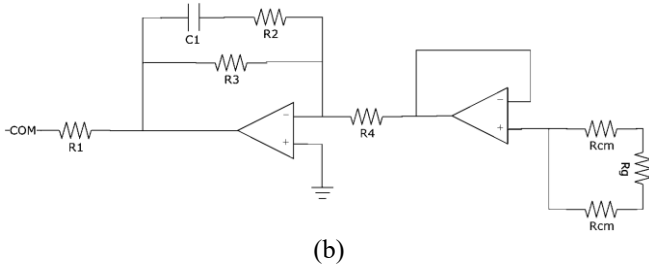
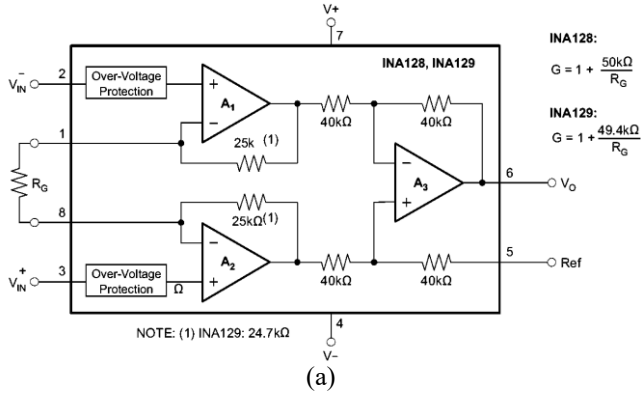
$$V_{out,1} = V_1 \frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) \quad (2.6)$$

Pada langkah superposisi kedua, tegangan V_1 adalah setara dengan nol. Melakukan analisis yang serupa akan mendapatkan $V_{out,2}$:

$$V_{out,2} = -V_2 \frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) \quad (2.7)$$

Menjumlahkan $V_{out,1}$ dan $V_{out,2}$ memberikan persamaan terakhir:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) \frac{R_3}{R_2} (V_2 - V_1) \quad (2.8)$$



Gambar 2.6 (a) Struktur rangkaian dari INA128, (b) Rangkaian *common-mode rejection*.

Salah satu IC penguat instrumentasi adalah INA128. Struktur rangkaian dari IC ini dapat dilihat pada Gambar 2.6a. IC ini memiliki tegangan *offset* yang rendah, yaitu 0,5 μ V, dan penolakan sinyal *common* sebesar 120dB. Struktur dasar dari INA128 adalah terdiri dari tiga penguat operasional. Terdapat satu penguat operasional untuk *buffer* tiap masukan (+, -), dan satu untuk memproduksi keluaran yang diinginkan. Penguatan dari rangkaian ini adalah

$$G = \frac{V_{out}}{(V_{in}^+ - V_{in}^-)} = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (2.9)$$

2.4.4. Rangkaian *Common-mode Rejection*

Dalam rangka mengurangi sinyal *common-mode*, sebuah fraksi dari sinyal harus dibalik dan di-*drive* kembali ke pasien melalui sebuah

elektroda yang diletakkan pada kaki kanan, yang umumnya disebut sebagai rangkaian *right leg drive* (RLD) atau *driven right leg* (DRL) [17]. Arus balik dengan satuan mikro-ampere atau kurang adalah sangat dibutuhkan untuk peningkatan signifikan dari CMRR. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6b, tegangan *common-mode* akan di-*sensing* oleh dua resistor rata-rata (R_{CM}), kemudian dibalik, dan dikuatkan (dengan sebuah penguat operasional *auxiliary*), dan diumpan balik ke elektroda *right-leg* dengan R_1 sebagai *current-limiter* [20]. Rangkaian ini pada dasarnya membentuk sebuah rangkaian umpan-balik negatif, yang melakukan *drive* terhadap tegangan *common-mode* menjadi mendekati nol. Penguatan pada rangkaian ini dapat diwakili dengan rumus berikut:

$$|G(s)| = \frac{R_3}{R_4} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f R_1 C_1)^2}} \quad (2.10)$$

Rangkaian ini juga dapat meningkatkan keamanan dari pasien [17]. Apabila ada kebocoran listrik yang disebabkan oleh tegangan tinggi muncul antara pasien dan *ground*, maka penguat operasional *auxiliary* pada *right-leg* akan menjadi saturasi, dan secara efektif melakukan *unground* pada pasien.

2.4.5. Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial

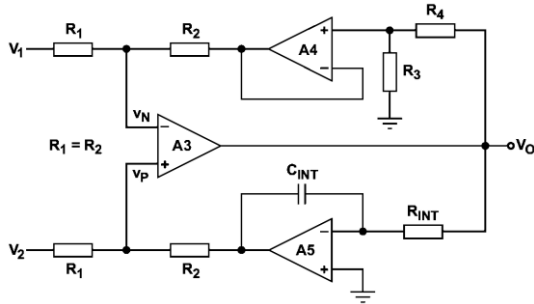
Sebuah potensial listrik tipikal memiliki sebuah 0,5-1,5mV sinyal AC dengan lebar pita 0,05-100Hz dan terkadang hingga 1kHz [21]. Sinyal ini terkadang terpengaruh oleh tegangan *offset* DC dari elektroda sekitar $\pm 500\text{mV}$ dan tegangan *common-mode* hingga 1,5V. Tegangan *common-mode* terdiri dari dua bagian: interferensi tegangan 50-60Hz dan tegangan *offset* DC dari elektroda.

Sebagai contoh, digunakan pengukuran sinyal elektrokardiogram. Sebuah elektroda menyadap tangan kanan pasien memiliki *offset* DC 450mV dan sinyal AC 50mV_{PP}, sementara pada tangan kiri memiliki *offset* DC 50mV dan sinyal AC 1,5mV_{PP}, sehingga diperoleh tegangan masukan diferensial sebesar [21]:

$$V_D = V_{D-DC} + V_{D-AC} \quad (2.11)$$

$$V_D = (V_{DC-R} - V_{DC-L}) + (V_{AC(PP)-R} - V_{AC(PP)-L}) \quad (2.12)$$

$$V_D = 400\text{mV} + 1\text{mV} \quad (2.13)$$



Gambar 2.7 Penguat beda dengan *Low-pass filter* (LPF) dan *stage* penguat [21].

Terlihat bahwa tegangan DC diferensial lebih besar 400 kali dibandingkan sinyal AC yang diinginkan. Apabila tidak ditangani, maka sinyal tersebut akan dikuatkan oleh penguat instrumentasi dan menyebabkannya saturasi. Oleh karena itu, harus diimplementasikan LPF pada *stage* keluaran untuk menghapus tegangan DC diferensial, V_{D-DC} [21], lihat Gambar 2.7. Pada gambar tersebut, LPF diimplementasikan bersamaan dengan penguat operasional A5, kapasitor C_{int} , dan resistor R_{int} membentuk rangkaian *integrator*. Frekuensi *cut-off* dari filter tersebut adalah:

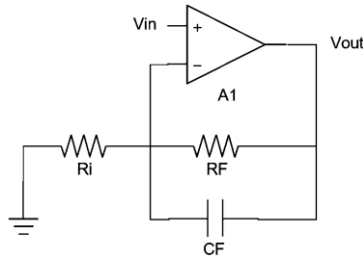
$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{int} C_{int}} \quad (2.14)$$

Frekuensi *cut-off* yang digunakan adalah 0,05Hz [18].

2.4.6. Rangkaian Penguat tak Membalik

Rangkaian penguat tak membalik berfungsi untuk menguatkan amplitudo tegangan tanpa membalik polaritas [19]. Dalam proses penguatannya, harus ditambahkan sebuah filter untuk mengurangi interferensi derau [18], sehingga akan dilakukan penggabungan rangkaian penguat tak membalik bersama dengan *low-pass filter* (LPF) yang terlihat pada Gambar 2.8. Penguatan yang diberikan oleh rangkaian ini adalah:

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (2.15)$$



Gambar 2.8 Rangkaian penguat tak membalik dengan LPF.

R_f dan C_f membentuk sebuah LPF orde satu yang dapat melemahkan frekuensi tinggi dan frekuensi derau lainnya (50Hz) [18]. Frekuensi *cut-off* tergantung dari nilai resistor R_f dan kapasitor C_f dengan persamaan:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (2.16)$$

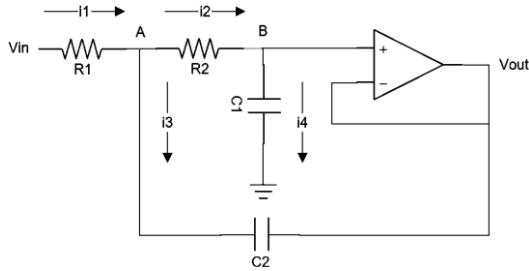
2.4.7. Rangkaian Filter Analog

Sebuah filter adalah sebuah rangkaian yang didesain untuk melewatkan pita frekuensi tertentu dengan melemahkan sinyal di luar pita lainnya [22]. Jaringan filter dapat berupa aktif atau pasif. Jaringan filter pasif hanya memiliki resistor, induktor, dan kapasitor. Berbeda dengan jaringan filter aktif yang memiliki tambahan yaitu penguat operasional. Melakukan filter pada frekuensi rendah dapat digunakan untuk meredam interferensi dari pergerakan elektroda dan komponen DC; melakukan filter pada frekuensi tinggi dapat meredam interferensi jala-jala listrik dan distorsi dari sinyal otot [19].

Terdapat banyak cara untuk melakukan konstruksi filter aktif. Terdapat dua topologi untuk realisasi filter (orde dua): Sallen-Key dan *Multiple Feedback* [23]. Konfigurasi yang ditawarkan oleh Sallen dan Key adalah menawarkan stabilitas, membutuhkan jumlah elemen yang sedikit, dan memiliki impedansi yang rendah, yang merupakan hal yang penting untuk melakukan *cascading* pada filter [22].

2.4.7.1 Low-pass Filter

Low-pass filter (LPF) dapat digunakan untuk melewatkan sinyal frekuensi rendah, dan menolak sinyal pada frekuensi di atas frekuensi *cut-off* dari filter [22]. Berikut adalah analisis dari LPF Sallen-Key orde 2 untuk rangkaian pada Gambar 2.9 [19]:



Gambar 2.9 LPF Sallen-Key orde dua penguatan satu.

Kirchoff's Current Law (KCL) pada titik A adalah:

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2.17)$$

KCL pada titik B adalah:

$$i_2 = i_4 \quad (2.18)$$

Dalam konfigurasi umpan-balik negatif, tegangan pada terminal tak membalik (V_+) dan terminal membalik (V_-) penguat operasional adalah sama. Karena V_- terhubung secara langsung dengan V_{out} , maka:

$$V_+ = V_- = V_{out} \quad (2.19)$$

Karena V_{out} sama dengan V_B , maka:

$$i_4 = \frac{V_B}{\frac{1}{j\omega C_2}} = V_B j\omega C_2 = j\omega C_2 V_{out} \quad (2.20)$$

$$i_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2} = \frac{V_A - V_{out}}{R_2} \quad (2.21)$$

Menggabungkan persamaan 2.20 dan 2.21 maka akan diperoleh

$$i_2 = i_4 \quad (2.22)$$

$$\frac{V_A - V_{out}}{R_2} = j\omega C_2 V_{out} \quad (2.23)$$

$$V_A = V_{out} + j\omega C_1 R_2 V_{out} \quad (2.24)$$

Berikut adalah persamaan untuk i_3 :

$$i_3 = \frac{V_A - V_{out}}{\frac{1}{j\omega C_2}} = (V_A - V_{out})j\omega C_2 \quad (2.25)$$

Menggabungkan persamaan 2.24 dan 2.25 maka akan diperoleh:

$$i_3 = (V_{out} + j\omega C_1 R_2 V_{out} - V_{out})j\omega C_2 \quad (2.26)$$

$$i_3 = -\omega^2 C_1 C_2 R_2 V_{out} \quad (2.27)$$

Berikut adalah persamaan untuk i_1 :

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2.28)$$

Menggabungkan persamaan 2.21, 2.27, dan 2.28 maka akan diperoleh:

$$\frac{V_i - V_A}{R_1} = j\omega C_1 V_{out} + (-\omega^2 C_1 C_2 R_2 V_{out}) \quad (2.29)$$

$$V_i = V_A + j\omega C_1 V_{out} - \omega^2 C_1 C_2 R_2 V_{out} \quad (2.30)$$

$$V_i = V_{out}[1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega C_1 (R_1 + R_2)] \quad (2.31)$$

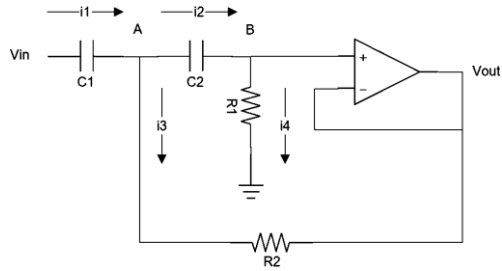
$$\frac{V_{out}}{V_i} = \frac{1}{1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega C_1 (R_1 + R_2)} \quad (2.32)$$

Pada LPF -40dB/dec, pada $\omega = \omega_c$ didapatkan nilai penguatan sebesar:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (2.33)$$

dengan sudut sama dengan -90° [19]. Agar dapat menghasilkan sudut tersebut, maka penyebut pada persamaan 2.32 harus sama dengan $+90^\circ$, sehingga nilai:

$$1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 0 \quad (2.34)$$



Gambar 2.10 HPF Sallen-Key orde dua penguatan satu.

atau

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.35)$$

Rumus untuk frekuensi *cut-off* dari LPF adalah:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.36)$$

2.4.7.2 High-pass Filter

High-pass filter (HPF) dapat menolak sinyal yang frekuensinya lebih rendah [22]. Berikut adalah analisis dari HPF Sallen-Key orde 2 untuk rangkaian pada Gambar 2.10 [19]:

KCL pada titik A adalah:

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2.37)$$

KCL pada titik B adalah:

$$i_2 = i_4 \quad (2.38)$$

Dalam konfigurasi umpan-balik negatif, tegangan pada terminal tak membalik (V_+) dan terminal membalik (V_-) penguat operasional adalah sama. Karena V_- terhubung secara langsung dengan V_{out} , maka:

$$V_+ = V_- = V_{out} \quad (2.39)$$

Karena V_{out} sama dengan V_B , maka:

$$i_4 = \frac{V_B}{R_1} = \frac{V_{out}}{R_1} \quad (2.40)$$

$$i_2 = \frac{\frac{V_A - V_B}{1}}{j\omega C_2} = (V_A - V_{out})j\omega C_2 \quad (2.41)$$

Menggabungkan persamaan 2.40 dan 2.41 maka akan diperoleh

$$i_2 = i_4 \quad (2.42)$$

$$(V_A - V_{out})j\omega C_2 = \frac{V_{out}}{R_1} \quad (2.43)$$

$$V_A = V_{out} + \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} \quad (2.44)$$

Berikut adalah persamaan untuk i_1 :

$$i_1 = \frac{\frac{V_i - V_A}{1}}{j\omega C_1} = j\omega C_1 (V_i - V_A) \quad (2.45)$$

$$i_1 = \left(V_i - V_{out} - \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} \right) j\omega C_1 \quad (2.46)$$

Berikut adalah persamaan untuk i_3 :

$$i_3 = \frac{V_A - V_{out}}{R_2} \quad (2.47)$$

Berikut adalah persamaan untuk i_1 :

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2.48)$$

Menggabungkan persamaan 2.41, 2.46, 2.47, dan 2.48 maka akan diperoleh:

$$\left(V_i - V_{out} - \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} \right) j\omega C_1 = (V_A - V_{out})j\omega C_2 + \frac{V_A - V_{out}}{R_2} \quad (2.49)$$

Menggabungkan persamaan 2.44, dan 2.49 maka akan diperoleh:

$$\left(V_i - V_{out} - \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} \right) j\omega C_1 = \left(V_{out} + \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} V_{out} \right) j\omega C_2 + \frac{V_{out} + \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} - V_{out}}{R_2} \quad (2.50)$$

$$\left(V_i - V_{out} - \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} \right) = \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} + \frac{V_{out}}{-\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \quad (2.51)$$

$$V_i = V_{out} + \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} + \frac{V_{out}}{j\omega C_2 R_1} - \frac{V_{out}}{\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \quad (2.52)$$

$$V_i = V_{out} \left[1 - \frac{V_{out}}{\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} + \frac{1}{j\omega R_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right] \quad (2.53)$$

$$\frac{V_{out}}{V_i} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} - \frac{1}{j\omega R_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (2.54)$$

Pada HPF -40dB/dec, pada $\omega = \omega_c$ didapatkan nilai penguatan sebesar:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (2.55)$$

dengan sudut sama dengan $+90^\circ$ [19]. Agar dapat menghasilkan sudut tersebut, maka penyebut pada persamaan 2.54 harus sama dengan -90° , sehingga nilai:

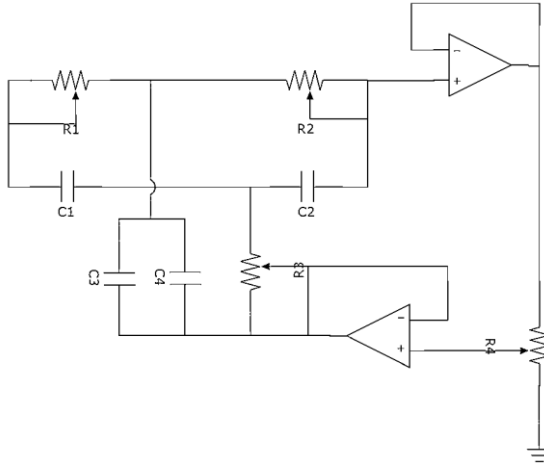
$$1 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} = 0 \quad (2.56)$$

atau

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.57)$$

Rumus untuk frekuensi *cut-off* dari HPF adalah:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.58)$$



Gambar 2.11 *Twin T network notch filter.*

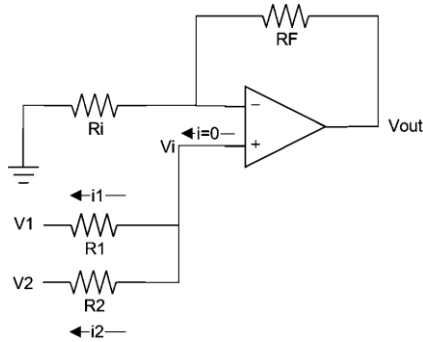
2.4.7.3 Notch Filter

Sebuah *notch filter* atau filter penolak pita digunakan untuk menekan sebuah frekuensi tertentu dan bukan rentang frekuensi [23]. *Notch filter* orde dua aktif yang populer adalah rangkaian *twin T* dan rangkaian Wien-Robinson. Dalam akuisisi sinyal EEG, *notch filter* digunakan meredam sinyal interferensi 50Hz. Gambar 2.11 merupakan topologi *twin T network notch filter*. Filter ini membutuhkan akurasi resistansi dan kapasitansi yang tinggi. Error komponen akan melakukan penyimpangan dari frekuensi tengah, 50Hz. Faktanya, sangat susah untuk memilih resistansi dan kapasitansi yang sama dengan nilai ideal, sehingga digunakan potensiometer presisi dibandingkan resistor pada umumnya. Potensiometer diatur sedemikian rupa hingga frekuensi 50Hz terjebak. Apabila nilai $R_1 = R_2 = 2R_3 = R$ dan nilai $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$, maka rumus frekuensi tengahnya adalah [23]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.59)$$

2.4.8. Rangkaian Isolasi

Interferensi 50Hz telah dilemahkan oleh *notch filter*, namun properti dari kartu *Analog-to-Digital Converter* (ADC) adalah bervariasi, dan terkadang tidak memiliki rangkaian isolasi, sehingga akuisisi *back-*



Gambar 2.13 Rangkaian *adder*.

$$i_1 + i_2 = 0 \quad (2.60)$$

$$\left(\frac{V_i - V_1}{R_1} \right) + \left(\frac{V_i - V_2}{R_2} \right) = 0 \quad (2.61)$$

$$\frac{V_i}{R_1} - \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_i}{R_2} - \frac{V_2}{R_2} = 0 \quad (2.62)$$

$$V_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \quad (2.63)$$

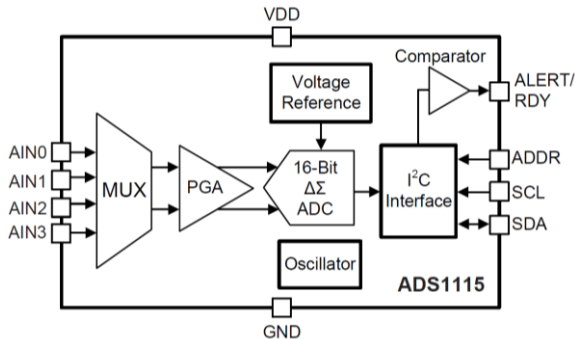
$$V_i = \frac{\frac{V_1 + V_2}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (2.64)$$

Dengan menggunakan rumus penguatan untuk penguat operasional tak membalik dan $R_1 = R_2 = R$, maka:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \quad (2.65)$$

Apabila $R_f = R_i$, maka akan diperoleh:

$$V_{out} = V_1 + V_2 \quad (2.66)$$



Gambar 2.14 Blok diagram sederhana dari ADS1115.

2.5. IC ADS1115

ADS1115 merupakan sebuah perangkat *Analog-to-Digital Converter* (ADC) yang presisi yang dapat mengukur sinyal yang besar atau kecil, mengonsumsi daya rendah, 16-bit, jenis delta-sigma, dan kompatibel dengan I²C besutan Texas Instruments. Perangkat ini juga memiliki *programmable gain amplifier* (PGA). Dalam melakukan konversi, kecepatannya dapat mencapai 860 sampel per detik (SPS). Blok diagram dari ADS1115 dapat dilihat pada Gambar 2.14. Berikut adalah fitur-fitur dari ADS1115:

- jangkauan suplai daya yang luas: 2.0V hingga 5.5V;
- konsumsi arus rendah (150μA) untuk mode konversi kontinu;
- *programmable data rate* (PGA): 8SPS hingga 860SPS;
- PGA menawarkan jangkauan masukan dari ±256mV hingga ±6,144V.
- *internal low-drift voltage reference*;
- osilator internal;
- komparator terprogram; dan
- rentang temperatur saat beroperasi: -40°C hingga +125°C.

2.6. Arduino Nano

Arduino/Genuino Nano memiliki pengontrol mikro ATmega328 dengan 8 porta analog I/O dan 14 porta digital I/O, dan 8-bit PWM [24]. Setiap pin dapat beroperasi pada 0-5V. Perangkat ini memiliki 32KB *flash memory*, 2KB SRAM, 1KB EEPROM, dan beroperasi pada frekuensi 16MHz. Gambar 2.15 merujuk pada penampakan fisik dari Arduino Nano.



Gambar 2.15 Perangkat Arduino Nano [24].

Berikut adalah spesifikasi dari Arduino Nano:

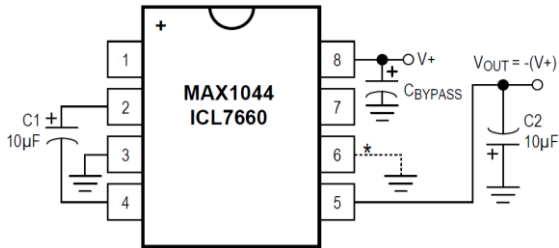
- pengontrol mikro : ATmega328P;
- arsitektur : AVR;
- tegangan operasi : 5V;
- kecepatan *clock* : 16MHz;
- arus DC untuk pin : 40mA;
- tegangan masukan : 7-12V; dan
- konsumsi daya : 19mA.

2.7. IC ICL7660

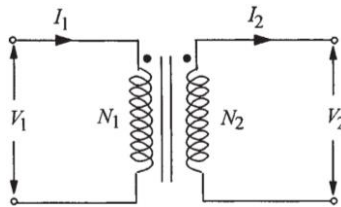
ICL7660 merupakan sebuah monolitik, CMOS *switched-capacitor voltage converters* yang membalik, melipatgandakan, membagi, atau mengali sebuah tegangan masukan positif besutan Maxim Integrated. Perangkat dapat beroperasi dari 1,5V hingga 10V, bahkan tanpa diode eksternal pada jangkauan temperatur yang tinggi sekalipun. IC ini dapat menghantarkan arus maksimum sebesar 10mA dengan drop sebesar 0,5V.

Berikut adalah contoh aplikasi dari ICL7660:

- suplai -5V dari suplai logika +5V dengan konfigurasi seperti yang terlihat pada gambar 2.17;
- perangkat komunikasi personal;
- telepon portabel;
- suplai tegangan penguat operasional;
- sistem akuisisi data; dan
- instrumen *hand-held*.



Gambar 2.16 Konfigurasi tegangan negatif dasar.



Gambar 2.17 Skematik representasi dari transformator [25].

2.8. Transformator

Transformator adalah sebuah perangkat statis yang mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensi [25]. Perangkat ini dapat mengonversi energi listrik dari lilitan primer yang dikonversi terlebih dahulu ke energi magnetik yang dikonversi balik ke energi listrik lagi pada rangkaian lainnya (lilitan sekunder, lilitan tersier, dan lain-lain). Gambar 2.17 merujuk pada skematik representasi dari transformator yang ideal.

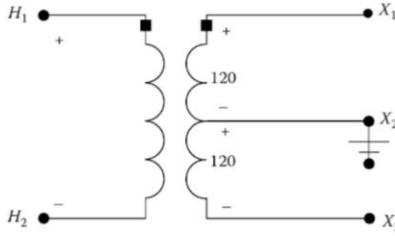
Menurut hukum Faraday, V_1 dan V_2 dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.67)$$

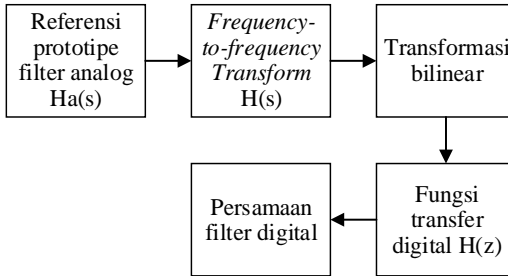
$$V_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.68)$$

Karena kedua lilitan berada dalam fluks yang sama, maka:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{-N_1}{-N_2} = a \quad (2.69)$$



Gambar 2.18 Lilitan sekunder *center-tapped* [26].



Gambar 2.19 Diagram alir desain filter Butterworth digital dari filter analog [27].

dengan $a > 1$ untuk transformator *step-down* dan $a < 1$ untuk transformator *step-up*.

Salah satu jenisnya adalah *center-tapped* (CT) *transformer* dengan *center tap* yang membagi lilitan sekunder ke dalam dua suplai tegangan AC sekunder [28]. Aplikasi transformator CT yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 adalah untuk suplai daya simetris.

2.9. Filter Digital

Proses filter dapat dilakukan secara digital. Filter digital dapat memroses sinyal dalam domain waktu [29]. Sinyal analog harus dicuplik terlebih dahulu dan didigitalkan pada interval diskrit (*clock*) menggunakan *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Gambar 2.19 menunjukkan proses desain untuk filter Butterworth digital. Berikut adalah filter prototipe analog $H_a(s)$ untuk orde 3:

$$H_a(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (2.70)$$

2.9.1 Low-pass Filter Digital

Berikut adalah penurunan rumus *low-pass filter* (LPF) dengan menggunakan Butterworth orde 3.

Pertama, dilakukan proses *Frequency-to-Frequency Transform*:

$$H_a(s)|_{s \leftarrow \frac{s}{\omega_p}} = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (2.71)$$

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_p}\right)^3 + 2\left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2 + 2\left(\frac{s}{\omega_p}\right) + 1} \quad (2.72)$$

$$H(s) = \frac{\omega_p^3}{s^3 + 2\omega_p s^2 + 2\omega_p^2 s + \omega_p^3} \quad (2.73)$$

Kedua, dilakukan proses transformasi bilinear untuk mendapatkan fungsi transfer digital $H(z)$:

$$H(s)|_{s \leftarrow \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{\omega_p^3}{s^3 + 2\omega_p s^2 + 2\omega_p^2 s + \omega_p^3} \quad (2.74)$$

$$H(z) = \frac{\omega_p^3}{\left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right)^3 + 2\omega_p \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right)^2 + 2\omega_p^2 \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right) + \omega_p^3} \quad (2.75)$$

$$H(z) = \frac{\frac{\omega_p^3 T^3 (1+z^{-1})^3}{T^3 (1+z^{-1})^3}}{\frac{\frac{2^3 (1-z^{-1})^3}{T^3 (1+z^{-1})^3} + \frac{2\omega_p 2^2 (1-z^{-1})^2 T (1+z^{-1})}{T^3 (1+z^{-1})^3}}{T^3 (1+z^{-1})^3} + \frac{2\omega_p^2 2 (1-z^{-1}) T^2 (1+z^{-1})^2}{T^3 (1+z^{-1})^3} + \frac{\omega_p^3 T^3 (1+z^{-1})^3}{T^3 (1+z^{-1})^3}} \quad (2.76)$$

$$H(z) = \frac{\omega_p^3 T^3 (1+z^{-1})^3}{2^3 (1-z^{-1})^3 + 2\omega_p 2^2 (1-z^{-1})^2 T (1+z^{-1}) + 2\omega_p^2 2 (1-z^{-1}) T^2 (1+z^{-1})^2 + \omega_p^3 T^3 (1+z^{-1})^3} \quad (2.77)$$

$$H(z) = \frac{\omega_p^3 T^3 (1+3z^{-1}+3z^{-2}+z^{-3})}{2^3 (1-3z^{-1}+3z^{-2}-z^{-3}) + 8\omega_p T (1-z^{-1}-z^{-2}+z^{-3}) + 4\omega_p^2 T^2 (1+z^{-1}-z^{-2}-z^{-3}) + \omega_p^3 T^3 (1+3z^{-1}+3z^{-2}+z^{-3})} \quad (2.78)$$

$$H(z) = \frac{(\omega_p^3 T^3) + (3\omega_p^3 T^3)z^{-1} + (3\omega_p^3 T^3)z^{-2} + (\omega_p^3 T^3)z^{-3}}{(8+8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3) + (-24-8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)z^{-1} + (24-8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)z^{-2} + (-8+8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)z^{-3}} \quad (2.79)$$

Ketiga, akan didapatkan persamaan digital sebagai berikut:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(\omega_p^3 T^3) + (3\omega_p^3 T^3)z^{-1} + (3\omega_p^3 T^3)z^{-2} + (\omega_p^3 T^3)z^{-3}}{(8+8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3) + (-24-8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)z^{-1} + (24-8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)z^{-2} + (-8+8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)z^{-3}} \quad (2.80)$$

$$(8 + 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)y(n) + (-24 - 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-1) + (24 - 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-2) + (-8 + 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)y(n-3) = (\omega_p^3 T^3)x(n) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-1) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-2) + (\omega_p^3 T^3)x(n-3) \quad (2.81)$$

$$(8 + 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)y(n) = (\omega_p^3 T^3)x(n) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-1) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-2) + (\omega_p^3 T^3)x(n-3) - (-24 - 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-1) - (24 - 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-2) - (-8 + 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)y(n-3) \quad (2.82)$$

$$y(n) = \frac{(\omega_p^3 T^3)x(n) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-1) + (3\omega_p^3 T^3)x(n-2) + (\omega_p^3 T^3)x(n-3) - (-24 - 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-1) - (24 - 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + 3\omega_p^3 T^3)y(n-2) - (-8 + 8\omega_p T - 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)y(n-3)}{(8 + 8\omega_p T + 4\omega_p^2 T^2 + \omega_p^3 T^3)} \quad (2.83)$$

2.9.2 High-pass Filter Digital

Berikut adalah penurunan rumus *high-pass filter* (HPF) dengan menggunakan Butterworth orde 3.

Pertama, dilakukan proses *Frequency-to-Frequency Transform*:

$$H_a(s) \Big|_{s \leftarrow \frac{\omega_p}{s}} = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (2.84)$$

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{\omega_p}{s}\right)^3 + 2\left(\frac{\omega_p}{s}\right)^2 + 2\left(\frac{\omega_p}{s}\right) + 1} \quad (2.85)$$

$$H(s) = \frac{s^3}{\omega_p^3 + 2\omega_p^2 s + 2\omega_p s^2 + s^3} \quad (2.86)$$

Kedua, dilakukan proses transformasi bilinear untuk mendapatkan fungsi transfer digital $H(z)$:

$$H(s) \Big|_{s \leftarrow \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{s^3}{\omega_p^3 + 2\omega_p^2 s + 2\omega_p s^2 + s^3} \quad (2.87)$$

$$H(z) = \frac{\left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right)^3}{\omega_p^3 + 2\omega_p^2 \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right) + 2\omega_p \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right)^2 + \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}\right)^3} \quad (2.88)$$

$$H(z) = \frac{\frac{2^3(1-z^{-1})^3}{T^3(1+z^{-1})^3}}{\frac{\omega_p^3 T^3(1+z^{-1})^3}{T^3(1+z^{-1})^3} + \frac{2\omega_p^2 2(1-z^{-1})T^2(1+z^{-1})^2}{T^3(1+z^{-1})^3} + \frac{2\omega_p 2^2(1-z^{-1})^2 T(1+z^{-1})}{T^3(1+z^{-1})^3} + \frac{2^3(1-z^{-1})^3}{T^3(1+z^{-1})^3}} \quad (2.89)$$

$$H(z) = \frac{2^3(1-z^{-1})^3}{\omega_p^3 T^3(1+z^{-1})^3 + 2\omega_p^2 2(1-z^{-1})T^2(1+z^{-1})^2 + 2\omega_p 2^2(1-z^{-1})^2 T(1+z^{-1}) + 2^3(1-z^{-1})^3} \quad (2.90)$$





$$H(z) = \frac{2^3(1-3z^{-1}+3z^{-2}-z^{-3})}{\omega_p^3 T^3(1+3z^{-1}+3z^{-2}+z^{-3}) + 4\omega_p^2 T^2(1+z^{-1}-z^{-2}-z^{-3}) + 8\omega_p T(1-z^{-1}-z^{-2}+z^{-3}) + 2^3(1-3z^{-1}+3z^{-2}-z^{-3})} \quad (2.91)$$

$$H(z) = \frac{(8)-(24)z^{-1}+(24)z^{-2}-(8)z^{-3}}{(\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T + 8) + (3\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T - 24)z^{-1} + (3\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T + 24)z^{-2} + (\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T - 8)z^{-3}} \quad (2.92)$$

Ketiga, akan didapatkan persamaan digital sebagai berikut:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(8)-(24)z^{-1}+(24)z^{-2}-(8)z^{-3}}{(\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T + 8) + (3\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T - 24)z^{-1} + (3\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T + 24)z^{-2} + (\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T - 8)z^{-3}} \quad (2.93)$$

$$(\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T + 8)y(n) + (3\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T - 24)y(n-1) + (3\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T + 24)y(n-2) + (\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T - 8)y(n-3) = (8)x(n) - (24)x(n-1) + (24)x(n-2) - (8)x(n-3) \quad (2.94)$$

| Type of Transform | Example Signal |
|---|---|
| Fourier Transform <i>signals that are continious and aperiodic</i> |  |
| Fourier Series <i>signals that are continious and periodic</i> |  |
| Discrete Time Fourier Transform <i>signals that are discrete and aperiodic</i> |  |
| Discrete Fourier Transform <i>signals that are discrete and periodic</i> |  |

Gambar 2.20 Ilustrasi keluarga *Fourier Transform* [30].

$$\begin{aligned}
 (\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T + 8)y(n) &= (8)x(n) - (24)x(n-1) + (24)x(n-2) - \\
 (8)x(n-3) - (3\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T - 24)y(n-1) &- (3\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 - \\
 8\omega_p T + 24)y(n-2) - (\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T - 8)y(n-3) &\quad (2.95)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y(n) &= \\
 (8)x(n) - (24)x(n-1) + (24)x(n-2) - (8)x(n-3) - (3\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T - 24)y(n-1) &- \\
 - (3\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 - 8\omega_p T + 24)y(n-2) - (\omega_p^3 T^3 - 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T - 8)y(n-3) &- \\
 \hline
 (\omega_p^3 T^3 + 4\omega_p^2 T^2 + 8\omega_p T + 8) &\quad (2.96)
 \end{aligned}$$

2.10. Transformasi Fourier

Analisis Fourier merupakan sebuah keluarga dari teknik matematika, yang berdasarkan dekomposisi sinyal ke dalam sinyal-sinyal sinusoid [30]. Istilah Transformasi Fourier dibagi ke dalam empat kategori berdasarkan tipe sinyal (lihat Gambar 2.20).

- *Aperiodic-continuous*

Contohnya: *decaying exponential* dan kurva Gaussian. Sinyal-sinyal ini memanjang ke positif dan negatif tak hingga ‘tanpa’ adanya sebuah pola periodik. Transformasi Fourier untuk sinyal ini adalah **Transformasi Fourier**.

- *Periodic-continuous*

Contohnya: gelombang sinus, gelombang kotak, dan gelombang lainnya yang berulang dalam sebuah pola reguler dari negatif hingga positif tak hingga. Versi transformasi Fourier untuk sinyal ini disebut **Deret Fourier**.

- *Aperiodic-discrete*

Sinyal-sinyal ini hanya terdefinisi pada poin-poin diskrit antara positif dan negatif tak hingga, dan tidak berulang. Tipe Fourier Transform untuk sinyal ini disebut **Discrete Time Fourier Transform**.

- *Periodic-discrete*

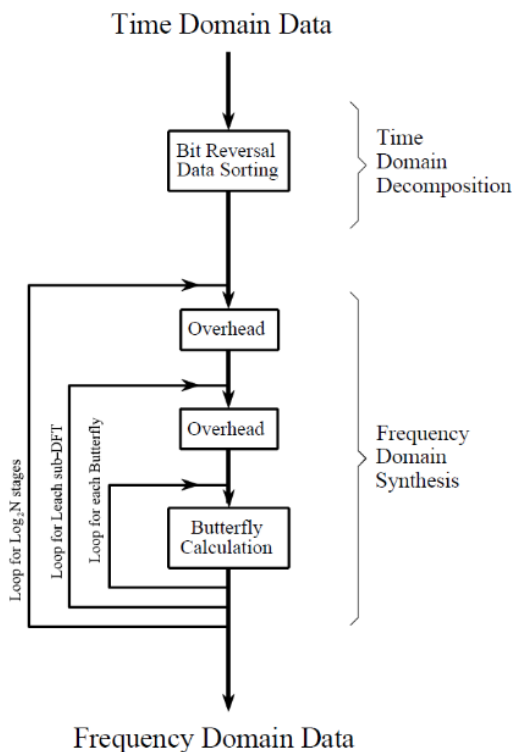
Sinyal ini termasuk sinyal diskrit yang berulang dari negatif hingga positif tak hingga. Kelas untuk Fourier Transform ini sering disebut *Discrete Fourier Series*, atau **Discrete Fourier Transform**.

Keempat kelas sinyal tersebut memanjang dari positif dan negatif tak hingga. Transformasi Fourier tidak memiliki versi untuk sinyal yang panjangnya tak hingga, sehingga diperlukan manipulasi agar data menjadi terlihat tak hingga, yaitu dengan membuat sampel imitasi bernilai nol [30]. Teknik ini membuat sinyal terlihat diskrit dan tidak berperiode, sehingga *Discrete Time Fourier Transform* (DTFT) berlaku. Atau sebagai alternatif dapat pula sinyal imitasi berupa salinan dari sinyal yang panjangnya berhingga, yang membuat sinyal seolah-olah adalah diskrit dan periodik, sehingga *Discrete Fourier Transform* (DFT).

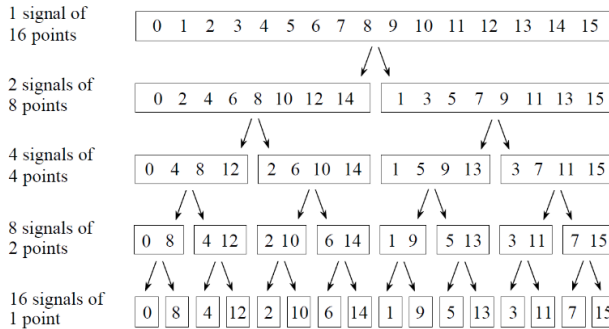
Ternyata, jumlah tak hingga dari gelombang sinusoid dibutuhkan untuk melakukan sintesis sebuah sinyal tidak berperiode, sehingga penggunaan DTFT adalah tidak mungkin direalisasikan secara digital, sehingga DFT adalah solusinya [30], [31]. DFT mengubah sinyal masukan (dekomposisi) sebanyak N-poin ke dalam dua sinyal keluaran sebanyak N/2+1 poin. Sinyal masukan berupa sinyal yang ingin didekomposisi, dan dua sinyal keluaran terdiri dari amplitudo dari komponen gelombang sinus dan kosinus. Sinyal masukan berada dalam domain waktu, karena sampel diambil pada interval waktu, dan amplitudo dari gelombang sinus dan kosinus mewakili domain frekuensi. Berikut adalah persamaan dekomposisi dari DFT dengan menggunakan metode korelasi, yaitu metode deteksi sebuah gelombang diketahui yang berada dalam sinyal lain dengan mengalikan kedua sinyal dan menjumlahkan semua poin:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi nk/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.97)$$

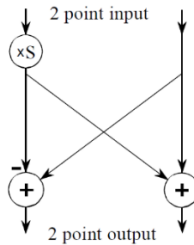
Terdapat pula metode dekomposisi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT mampu menghitung DFT dengan proses kalkulasi yang lebih efisien [31]. Dalam praktik, teknik DFT berbasis korelasi digunakan apabila poin yang digunakan sekitar 32 poin, selain itu FFT harus digunakan [30]. Berbeda dengan DFT, FFT mentransformasikan dua sinyal sebanyak N-poin dalam domain waktu ke dalam dua sinyal sebanyak N-poin dalam domain frekuensi.



Gambar 2.21 Diagram alur dari FFT [30].



Gambar 2.22 Dekomposisi FFT [30].

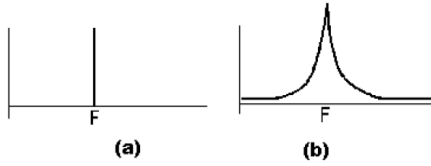


Gambar 2.23 Operasi *Butterfly* [30].

Terdapat tiga langkah dalam melakukan FFT, seperti yang terlihat pada Gambar 2.21: (1) melakukan dekomposisi sinyal sebanyak N -poin dalam domain waktu ke dalam sinyal-sinyal N -poin yang masing-masing memiliki satu poin, (2) mencari spektrum dari tiap sinyal-sinyal N -poin, dan (3) sintesis spektra frekuensi N ke dalam spektrum frekuensi tunggal.

Gambar 2.22 merujuk pada contoh dari dekomposisi sinyal domain waktu yang digunakan dalam FFT pada langkah pertama. Terdapat sinyal dengan 16 poin yang didekomposisi dengan empat tahap. Dekomposisi *interlaced* dilakukan untuk memisahkan sinyal ke dalam dua kategori: sampel genap dan ganjil yang merupakan sebuah teknik mengurutkan sampel dalam sinyal dengan bit yang terbalik atau *bit reversal*.

Pada langkah kedua, akan dilakukan pencarian spektra frekuensi pada satu titik dari sinyal-sinyal domain waktu. Pada tahap ini, tidak akan dilakukan apa pun, karena spektrum frekuensi dari sebuah sinyal 1 poin setara dengan nilai dirinya sendiri.



Gambar 2.24 (a) FFT ideal, (b) FFT dengan *leakage* [31].

Langkah terakhir adalah melakukan sintesis spektra frekuensi N ke dalam spektrum frekuensi tunggal. Proses sintesis dapat dilakukan menggunakan operasi *Butterfly*. Diagram dari operasi *Butterfly* dapat dilihat pada Gambar 2.23.

Leakage dalam perhitungan FFT dapat terjadi dalam bentuk pelebaran spektra pada frekuensi asal [31], seperti yang terlihat pada Gambar 2.24. Cacat ini dapat disebabkan oleh fenomena perhitungan dalam FFT yang berkaitan dengan panjang data (N) dan dapat diatasi dengan menggunakan jenis *window* atau jendela yang tepat [31].

Window merupakan pengambilan himpunan bagian kecil dari sinyal masukan alias pemotongan pada data sinyal. Proses *window* dapat berupa konvolusi antara keluaran FFT dengan *window* yang sudah di-FFT dalam domain frekuensi, atau dapat berupa perkalian sinyal masukan dengan fungsi *window* dalam domain waktu. Berikut adalah beberapa persamaan fungsi *window* [31]:

$$w_{\text{rectangular}}[n] = 1, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.98)$$

$$w_{\text{hanning}}[n] = 0.1 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right], 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.99)$$

$$w_{\text{hamming}}[n] = 0.54 - 0.46 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right), 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.100)$$

Untuk sinyal alfa, *window* jenis Hamming cocok digunakan, karena memiliki *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang cukup tinggi [32] apabila dibandingkan dengan ketiga *window* di atas.

2.11. Pembelajaran Mesin

Pembelajaran mesin merupakan salah satu cabang dari kecerdasan buatan yang menggunakan komputasi, sehingga sistem dapat belajar dari data yang akan dilatih [33]. Sistem dapat belajar dan meningkatkan

performa seiring dengan pengalaman dan waktu, menyempurnakan sebuah model yang dapat digunakan untuk memprediksi keluaran dari masukan berdasarkan pembelajaran sebelumnya.

Berdasarkan karakteristik algoritma umpan-baliknya, pembelajaran mesin terbagi menjadi tiga: pembelajaran terarah (*supervised learning*), pembelajaran tak terarah (*unsupervised learning*), dan pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) [34]. Dalam pembelajaran terarah, mesin belajar mengamati contoh pasangan masukan-keluaran dan mempelajari sebuah fungsi yang memetakan antara masukan terhadap keluaran. Pada pembelajaran tak terarah, mesin belajar dengan mengenali pola-pola tersembunyi dari masukan sekalipun tanpa adanya umpan-balik yang eksplisit yang diberikan. Pada pembelajaran penguatan, mesin mempelajari dari serangkaian *reinforcement*—penghargaan atau pemberian hukuman.

Dalam pembelajaran terarah, mesin belajar mengamati contoh pasangan masukan-keluaran dan mempelajari sebuah fungsi yang memetakan antara masukan terhadap keluaran. Pembelajaran terarah dapat dibagi menjadi dua: klasifikasi dan regresi. Apabila keluaran merupakan satu dari serangkaian nilai yang terbatas (seperti cerah, berawan, atau hujan), masalah pembelajaran mesin ini disebut klasifikasi mengingat respons prediksinya yang sifatnya diskrit. Salah satu contoh dari pembelajaran mesin klasifikasi adalah Mesin Vektor Pendukung atau *Support Vector Machine* (SVM). Ketika keluarannya berupa sebuah angka (seperti temperatur pada esok hari), masalah pembelajarannya akan disebut regresi mengingat respons prediksinya yang sifatnya kontinu. Contoh pembelajaran mesin regresi adalah Jaringan Syaraf Tiruan atau *Artificial Neural Networks* (ANN).

SVM merupakan adalah sebuah teknik pembelajaran terarah (*supervised learning*) untuk menghasilkan fungsi pemetaan masukan dan keluaran dari himpunan data latih berlabel [35]. Fungsi pemetaan dapat berupa sebuah fungsi klasifikasi, seperti kategori dari data masukan, atau sebuah fungsi regresi. Untuk klasifikasi, fungsi kernel non-linear digunakan untuk melakukan transformasi data masukan ke sebuah *high-dimensional feature space*, sehingga data masukan cenderung dapat dipisahkan daripada sebelumnya. Kemudian, *maximum-margin hyperplanes* dibuat. Setelah itu, model pembelajaran mesin akan diproduksi bergantung pada sebuah subset data latih yang dekat dengan *class boundaries*.

Pada awalnya, SVM didesain untuk klasifikasi biner ($k = 2$) [36]. Pada permasalahan dunia nyata, dibutuhkan diskriminasi dengan kategori lebih dari dua ($k > 2$) alias multi-kelas. Salah satu manfaat dari SVM multi-kelas ini adalah untuk bioinformatika [37]. Dalam praktiknya, permasalahan klasifikasi multi-kelas didekomposisi ke dalam serangkaian permasalahan biner, sehingga SVM standar dapat digunakan. Terdapat dua skema pendekatan: *one-versus-rest* (1VR) dan *one-versus-one* (1V1).

1V1 atau dekomposisi berpasangan (*pairwise decomposition*) mengevaluasi semua pengklasifikasi pasangan yang mungkin, sehingga menghasilkan pengklasifikasi biner sebanyak $k(k-1)/2$ individu. Dalam penentuan sebuah fungsi keputusan (*decision function*) untuk sepasang kelas, digunakan data latih untuk dua kelas yang berhubungan [38]. Oleh karena itu, pada setiap sesi latih, jumlah data latih akan dikurangi dibandingkan dengan teknik 1VR. Menggunakan masing-masing pengklasifikasi terhadap data uji, maka akan didapatkan satu *vote* untuk kelas pemenang.

Berikut adalah fungsi keputusan untuk kelas i terhadap kelas j , dengan *maximum-margin*:

$$D_{ij}(\mathbf{x}) = \mathbf{w}_{ij}^T \phi(\mathbf{x}) + b_{ij} \quad (2.101)$$

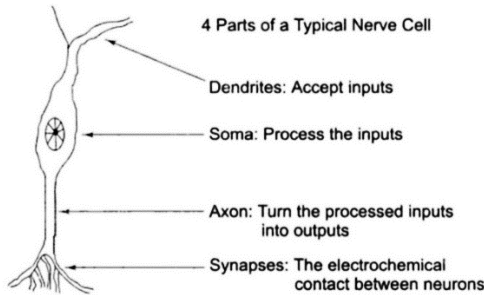
dengan w_{ij} adalah vektor *l-dimensional*, $\phi(\mathbf{x})$ adalah sebuah fungsi pemetaan yang memetakan \mathbf{x} ke dalam *l-dimensional feature space*, b_{ij} adalah bias, dan $D_{ij}(\mathbf{x}) = -D_{ji}(\mathbf{x})$.

Region-region

$$R_i = \{\mathbf{x} \mid D_{ij}(\mathbf{x}) > 0, j = 1, \dots, n, j \neq i\} \quad \text{untuk } i = 1, \dots, n \quad (2.102)$$

tidak tumpang tindih, dan apabila \mathbf{x} di dalam R_i , \mathbf{x} dapat dikategorikan sebagai milik kelas i . \mathbf{x} diklasifikasikan melalui *voting*, yaitu, untuk vektor masukan \mathbf{x} dapat dihitung

$$D_i(\mathbf{x}) = \sum_{j \neq i, j=1}^n \text{sign}(D_{ij}(\mathbf{x})), \quad (2.103)$$



Gambar 2.25 Sebuah neuron biologis [39].

dengan

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } x \geq 0, \\ -1 & \text{untuk } x < 0, \end{cases} \quad (2.104)$$

dan \mathbf{x} diklasifikasikan ke dalam kelas dengan

$$\arg \max_{i=1, \dots, n} D_i(\mathbf{x}) \quad (2.105)$$

Apabila $\mathbf{x} \in R_i$, $D_i(\mathbf{x}) = n - 1$, dan $D_k(\mathbf{x}) < n - 1$ untuk $k \neq i$, maka \mathbf{x} dapat diklasifikasikan ke dalam kelas i .

ANN merupakan perangkat pemroses informasi (sinyal) non-linear, yang dibentuk dari kumpulan neuron, seperangkat pemroses dasar yang saling terhubung [39]. Neuron dalam kecerdasan buatan berperan sebagai sebuah saraf biologis, seperti yang terlihat pada Gambar 2.25 [40]. Pembelajaran dalam sistem biologis melibatkan pengaturan dari koneksi sinaptik yang berada di antara neuron. Hal serupa berlaku untuk ANN. Contoh aplikasi dari ANN adalah untuk pengenalan pola hasil ekstraksi dari fitur *Mel Frequency Cepstrum Coefficient* dan *Fast Fourier Transform* [41], pengenalan pola untuk identifikasi *mixed vapour* berbasis hidung elektronik [42], pengenalan pola suara sinyal kerusakan motor listrik [31], dan lain-lain.

Sebuah *neural network* (NN) adalah prosesor masif yang terdistribusi secara paralel yang memiliki kecenderungan natural untuk menyimpan pengetahuan empiris dan membuatnya tersedia untuk digunakan [39]. NN adalah menyerupai otak pada dua aspek:

- pengetahuan diperoleh melalui proses belajar; dan

- kekuatan koneksi antar-neuron yang diketahui sebagai *synaptic weight* digunakan untuk menyimpan pengetahuan.

Sebuah neuron biologis atau sel saraf terdiri dari sinapsis, dendrit, tubuh sel, dan akson [39]. Berikut adalah penjelasannya.

- Sinapsis adalah perangkat biokimia, yang mengonversi sinyal listrik pre-sinaptik menjadi sinyal kimia dan kemudian mengembalikannya ke dalam sebuah sinyal listrik pos-sinaptik. Rentetan pulsa masukan memiliki amplitudo yang dimodifikasi oleh karena parameter-parameter yang terdapat pada sinapsis. Sifat alamiah dari modifikasi tergantung tipe dari sinapsis, yang dapat berupa *inhibitory* atau *excitatory*.
- Sinyal pos-sinaptik kemudian diagregasi dan dikirim sepanjang dendrit menuju tubuh sel saraf.
- Tubuh sel menghasilkan sinyal keluaran *neuronal*, sebuah *spike*, yang dikirim sepanjang akson menuju terminal sinaptik dari neuron lainnya.
- Frekuensi dari *firing* sebuah neuron proporsional terhadap total aktivitas sinaptik dan dikontrol parameter sinaptik (w).

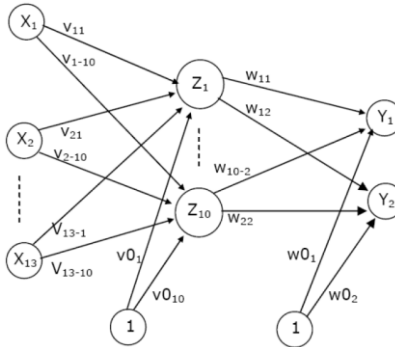
Feed forward network merupakan salah satu topologi ANN dengan sinyal masukan mengalir dari unit-unit masukan menuju unit-unit keluaran pada arah *forward*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.26. Dalam ANN, nilai *weight* (w) diperoleh melalui proses pembelajaran. Umumnya digunakan *backpropagation* untuk pembelajarannya, karena kemudahan perancangan dengan ketelitian yang tinggi [43]. Pembelajaran pada metode ini meliputi: (1) *feedforward propagation*, dan (2) *backward propagation* [31]. Pelatihan diulang sampai diperoleh error yang diinginkan, yang dinyatakan:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - y_k)^2 \quad (2.106)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_p E_p}{p}} \quad (2.107)$$

Pada *feedforward propagation* dilakukan perhitungan fungsi aktivasi tiap neuron, yang dinyatakan:

$$z_{inj} = v_{oj} + \sum_j x_j v_{ij} \quad (2.108)$$



Gambar 2.26 Arsitektur ANN [31].

$$z_j = f(z_{in_j}) \quad (2.109)$$

2.12. .NET

.NET adalah sebuah lingkungan atau *environment* besutan Microsoft dengan program yang berjalan di dalamnya [44]. Lingkungan ini bukanlah sistem operasi, melainkan bertindak sebagai layer antara sistem operasi dan aplikasi lainnya. .NET mendukung perancangan menggunakan beberapa bahasa pemrograman: Visual Basic, C#, C++, dan sejumlah bahasa pemrograman pihak ketiga, seperti Alice, APL, COBOL, Pascal, Eiffel, FORTRAN, Haskell, Mercury, ML, Mondrain, Oberon, Perl, Python, RPG, Scheme, Smalltalk, dan lain-lain. Semua kode dari tiap-tiap bahasa dapat di-*compile* melalui Microsoft Intermediate Language (IL). .NET memiliki *class library*, yang menyediakan koleksi 2.500 jenis kelas yang tersedia untuk digunakan.

Accord.NET adalah sebuah *framework* .NET untuk pembelajaran mesin yang dikombinasikan dengan pustaka pemrosesan audio dan gambar yang ditulis dalam C# [45] yang dibuat oleh César Roberto de Souza. *Framework* dapat digunakan untuk pembangunan penglihatan komputer, audisi komputer, pemrosesan sinyal, dan aplikasi-aplikasi statistik [46]. Accord.NET juga dapat digunakan untuk kepentingan komersial. *Source code* dari proyek ini tersedia di bawah GNU Lesser Public License, versi 2.1.

C# adalah bahasa pemrograman dengan fitur antarmuka pengguna grafis atau *graphical user interface* (GUI) dari Visual Basic, digabung dengan C++, dan *object-oriented class library* yang mirip dengan Java

[44]. C# didesain oleh Microsoft untuk .NET, dan merupakan bahasa yang sering digunakan untuk pembangunan *class library* .NET. C# digunakan untuk membuat komponen perangkat lunak apa pun, termasuk aplikasi *mobile*, situs Web dinamis, komponen akses basis data, aplikasi *desktop* Windows, servis Web, dan aplikasi berbasis konsol.

Sintak utama dari bahasa C# serupa dengan bahasa gaya C lainnya, seperti C, C++, dan Java. Berikut adalah ciri-cirinya:

- titik koma digunakan untuk menandakan akhir dari sebuah pernyataan;
- *curly brackets* digunakan untuk mengelompokkan pernyataan. Pernyataan umumnya dikelompokkan ke dalam metode (fungsi), metode ke dalam kelas, dan kelas ke dalam *namespace*;
- variabel ditetapkan dengan menggunakan simbol kesetaraan, tetapi perbandingan menggunakan dua simbol kesetaraan secara berurutan; dan
- kurung kotak digunakan bersama *array*, keduanya untuk melakukan deklarasi dan mendapatkan sebuah nilai pada indeks yang telah diberikan.

.NET mendefinisikan sebuah *namespace* System.IO.Ports yang memiliki sejumlah kelas [47]. Kelas utama dari *namespace* ini adalah SerialPort yang merupakan representasi dari sumber daya SerialPort dan menyediakan metode-metode yang memungkinkan adanya komunikasi. Terdapat metode yang penting dalam kelas ini [48]:

- Open(): membuka sebuah koneksi porta serial;
- Close(): menutup sebuah koneksi porta serial;
- ReadLine(): membaca NewLine pada *input buffer*;
- WriteLine(string): melakukan *append* string dengan sebuah NewLine dan menuliskannya kepada *output buffer*.

2.13. Basis Data SQL

Basis data adalah sebuah repositori yang didesain untuk mengorganisasi dan mengakses informasi [49]. Perangkat lunak yang didesain untuk menyimpan, memanipulasi, dan menerima data dalam sebuah basis data disebut sebagai Sistem Manajemen Basis Data atau *Database Management System* (DBMS). *Structured Query Language* (SQL) merupakan salah satu bahasa yang digunakan dalam DBMS. Terdapat beberapa DBMS yang dapat menjalankan program SQL:

Microsoft Access, Microsoft SQL Server, Oracle, IBM DB2, MySQL, dan PostgreSQL [50].

Berikut adalah beberapa pernyataan atau *statement* yang digunakan dalam *Transact-SQL* (T-SQL) buatan Microsoft dan Sybase:

- *Data Definition Language*

Bahasa yang digunakan untuk mengekspresikan skema basis data melalui serangkaian definisi-definisi [51]. CREATE digunakan untuk membuat obyek baru (basis data, tabel, dan lain-lain), USE untuk menggunakan obyek, ALTER untuk mengubah obyek yang sudah ada, dan DROP untuk menghapus obyek

- *Data Manipulation Language*

Bahasa yang memungkinkan pengguna untuk untuk mengakses atau memanipulasi data yang terdapat pada data model [51]. SELECT digunakan untuk menampilkan data, INSERT untuk menambah data baru, UPDATE untuk mengubah data yang sudah ada, dan DELETE untuk menghapus data.

2.14. *Binning*

Noise atau derau dapat didefinisikan sebagai eror acak yang dapat terjadi pada saat proses *data mining* [52]. Solusi dari permasalahan derau ini adalah dengan melakukan pengelompokan data ke dalam bin atau *binning*. *Binning* terhadap data merupakan alat yang digunakan secara umum pada analisis data dan pembelajaran mesin [53]. Dalam *binning*, data dibagi ke dalam *bucket-bucket* atau *bin-bin* dengan ukuran yang setara. Data kemudian dapat diperhalus dengan menggunakan rata-rata, median, atau batas-batas dari bin.

2.15. *Korelasi Silang*

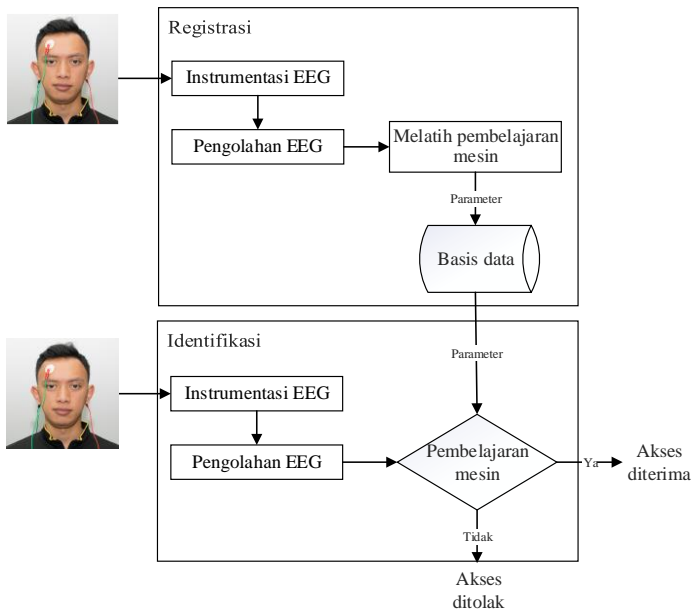
Dalam pemrosesan sinyal, korelasi silang digunakan untuk mengukur kesamaan antara dua fungsi perpindahan dari satu relatif ke yang lain. Hal ini juga dikenal sebagai sebuah *sliding dot product* atau *sliding inner-product*. Aplikasinya adalah rekognisi pola, analisis partikel tunggal, tomografi elektron, rata-rata, *cryptanalysis*, dan neurofisiologi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

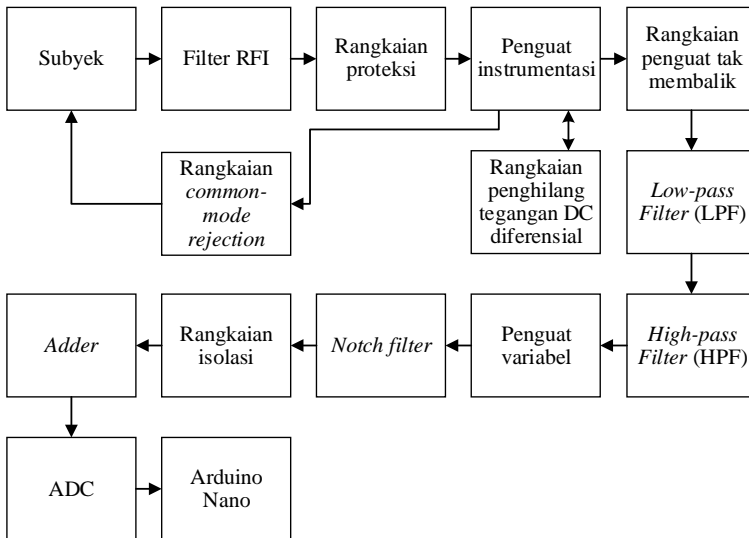
BAB III

PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini, akan dibahas mengenai perancangan sistem. Alur sistem autentikasi yang telah didesain dapat dilihat pada Gambar 3.1. Proses autentikasi terdiri dari registrasi berbasis sinyal elektroensefalografi (EEG) dan kata sandi. Perangkat keras dirancang untuk mengakuisisi sinyal EEG secara analog. Sinyal didigitalkan via ADS1115 dan dikirim ke Arduino Nano untuk diolah di *Personal Computer*. Perangkat lunak kemudian dirancang untuk dapat mengolah sinyal EEG berbasis lingkungan .NET agar dapat melakukan ekstraksi fitur autentikasi berbasis spektrum frekuensi sinyal alfa. Kemudian, dilakukan eksperimen untuk menemukan metode optimum dengan melakukan studi konfigurasi elektroda, properti sinyal alfa, dan jenis pembelajaran mesin, untuk melakukan autentikasi subyek. Metode optimum yang terpilih kemudian diintegrasikan dengan program antar-muka *real-time*. Fitur dari subyek disimpan dengan *Transact-SQL*.



Gambar 3.1 Diagram blok alur sistem autentikasi.



Gambar 3.2 Diagram blok perangkat keras EEG.

3.1. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem autentikasi dapat dikategorikan ke dalam dua bagian: perangkat keras yang mewakili instrumentasi sinyal elektroensefalografi (EEG) dan perangkat lunak yang mewakili pengolahan sinyal EEG, pembelajaran mesin, dan olah basis data. Perangkat keras didesain agar dapat memberikan sinyal EEG dalam orde kecil dapat dibaca oleh perangkat lunak. Perangkat lunak yang dibuat mengacu pada program yang digunakan untuk melakukan pengolahan sinyal, pembelajaran mesin terhadap fitur, dan olah basis data terhadap fitur subyek.

Berikut adalah alur dari perangkat keras sistem autentikasi biometrik EEG (lihat Gambar 3.2).

1. Rangkaian Filter *Radio Frequency Interference*

Pada tahap awal ini, sinyal yang diperoleh dari elektroda berfungsi untuk menapis sinyal frekuensi tinggi dan melewatkan sinyal frekuensi rendah dengan frekuensi *cut-off* sebesar 360Hz.

2. Rangkaian proteksi

Blok rangkaian proteksi berfungsi untuk mengamankan rangkaian instrumentasi dengan membatasi tegangan masukan dengan jangkauan -12V hingga 12V.

3. Rangkaian penguat instrumentasi

Menggunakan IC INA128P, rangkaian ini dapat melakukan penguatan terhadap sinyal masukan tahap awal sebesar 11,64x. Keluarannya akan dikuatkan kembali melalui rangkaian penguat tak membalik dan juga menjadi masukan bagi rangkaian penghilang tegangan DC diferensial, untuk mengurangi tegangan DC *offset* yang ada pada elektroda.

4. Rangkaian penghilang tegangan DC diferensial

Rangkaian ini akan menerima masukan dari penguat instrumentasi dan akan menapis sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* sebesar 0,05Hz, sehingga menyisakan sinyal DC murni. Keluaran dari rangkaian ini akan menjadi masukan bagi penguat instrumentasi pada pin REF untuk mengurangi tegangan DC *offset*.

5. Rangkaian *common-mode rejection*

Untuk mengurangi sinyal *common-mode* yang terdapat pada sinyal, dibuatlah sebuah rangkaian *common-mode rejection* atau *driven right leg* yang dapat memberikan umpan balik kepada subyek. Masukannya berasal dari sensor resistor rata-rata yang terdapat pada kedua sisi resistor penguatan pada penguat instrumentasi, yang tegangannya dibalik, dan dikuatkan dengan penguatan sebesar 50,48x.

6. Rangkaian penguat tak membalik

Pada tahap ini, sinyal dari penguat instrumentasi akan dikuatkan oleh penguatan tahap kedua sebesar 51x. Selain memberikan penguatan, rangkaian ini juga berperan sebagai *Low-pass Filter* (LPF) dengan frekuensi *cut-off* sebesar 33,86Hz. Hal ini bertujuan agar sinyal di atas frekuensi tersebut tidak dikuatkan secara berlebihan.

7. Rangkaian *Low-pass Filter*

Low-pass Filter (LPF) akan digunakan untuk melewatkan sinyal dari rangkaian penguat tak membalik dengan frekuensi di bawah frekuensi *cut-off* dengan nilai sebesar 72Hz dengan spesifikasi orde 6. Desain orde 6 ini dilakukan dengan cara *cascading* tiga LPF orde 2.

8. Rangkaian *High-pass Filter*

High-pass Filter (HPF) akan digunakan untuk melewatkan sinyal dari LPF dengan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* dengan nilai sebesar 0,23Hz dengan spesifikasi orde 6. Desain orde 6 ini dilakukan dengan cara *cascading* tiga HPF orde 2.

9. Rangkaian penguat variabel

Sebagai penguat tahap ketiga, penguat variabel dapat digunakan untuk memberikan penguatan yang tepat terhadap sinyal masukan dari HPF sebagai kompensasi terhadap blok-blok diagram lain yang memiliki toleransi terhadap nilai. Jangkauan dari penguatan yang dapat diberikan oleh penguat variabel ini adalah $2 \times 101x$.

10. Rangkaian *notch filter*

Sinyal yang diperoleh dari penguat variabel kemudian difilter menggunakan *notch filter*. Blok filter ini digunakan untuk meredam frekuensi jala-jala dengan frekuensi *cut-off* sebesar 50Hz, sehingga interferensi sinyal jalur komersial dapat ditapis.

11. Rangkaian isolasi

Selanjutnya, sinyal dari *notch filter* dikirimkan ke rangkaian isolasi. Rangkaian isolasi berperan untuk mengurangi interferensi sinyal 50Hz dan mengisolasi pasien dari peralatan yang terhubung dengan suplai daya komersial.

12. Rangkaian *adder*

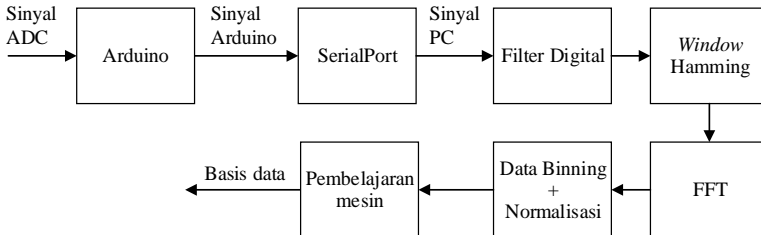
Adder berfungsi untuk menaikkan level tegangan dari rangkaian isolasi agar yang sinyal AC dapat menjadi sinyal DC dalam jangkauan tegangan 0V-5V, mengingat *Analog-to-Digital Converter* yang digunakan hanya dapat bekerja pada tegangan tersebut.

13. *Analog-to-Digital Converter*

ADS1115 adalah *Analog-to-Digital Converter* (ADC) yang akan digunakan untuk melakukan konversi sinyal analog yang diperoleh dari rangkaian *adder* ke dalam sinyal digital yang dapat diakuisisi dan dikirim oleh Arduino Nano.

14. Arduino Nano

Arduino Nano berfungsi untuk mengomunikasikan sinyal digital yang terdapat pada ADC ke dalam *Personal Computer* (PC). Arduino akan mengirimkan serangkaian *line* yang mewakili tegangan terbaca ADC. SerialPort akan menjadi kelas yang memungkinkan komunikasi Port COM ini terjadi.



Gambar 3.3 Diagram blok perangkat lunak EEG.

Berikut adalah alur dari perangkat lunak sistem autentikasi biometrik EEG yang terdapat pada Arduino dan PC (lihat Gambar 3.3).

1. **Arduino**

Perangkat lunak di dalam Arduino akan mengatur agar proses akuisisi yang dilakukan ADC memiliki frekuensi akuisisi sebesar 64Hz. Pembacaan yang dilakukan ADC kemudian dibaca dan dituliskan dalam *line* dan siap dikirim via SerialPort.

2. **SerialPort**

SerialPort merupakan kelas yang digunakan pada PC untuk membaca data *line* yang dikirimkan oleh Arduino selama 30 detik akuisisi, sehingga data dapat dikelola lebih lanjut di dalam PC.

3. **Filter digital**

Filter digital merupakan filter yang direalisasikan secara digital. Filter ini tersusun oleh LPF Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* sebesar 14Hz dan HPF Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* sebesar 4Hz.

4. **Window**

Window yang digunakan untuk mengatasi *leakage* yang dapat terjadi pada proses transformasi Fourier adalah *window* Hamming, yang merupakan *window* yang cocok untuk digunakan melakukan ekstraksi sinyal alfa.

5. **Fast Fourier Transform**

Menggunakan Accord.Math, sinyal yang telah di-*window* akan diekstrak fitur spektrum frekuensinya menggunakan *Fast Fourier Transform*. Fitur spektrum frekuensi ini merupakan modalitas dalam sistem autentikasi biometrik EEG ini.

6. **Data-binning dan normalisasi**

Pada tahap ini, hasil spektrum frekuensi akan dimasukkan ke dalam bin-bin. Untuk 1.024 bin, satu bin akan mewakili rata-rata

pada pita frekuensi sebesar 0,0625Hz. Untuk 128 bin, satu bin akan mewakili 0,5Hz. Untuk 64 bin, satu bin akan mewakili 1Hz.

7. Pembelajaran mesin

Pembelajaran mesin digunakan untuk mengenali fitur autentikasi. *Framework* yang digunakan untuk Mesin Vektor Pendukung adalah Accord.MachineLearning dan untuk Jaringan Syaraf Tiruan digunakan Accord.Neuro. Hasil pembelajaran mesin kemudian akan disimpan untuk proses identifikasi.

8. Basis data

Identitas subyek berupa nama dan kata sandi dan nama dokumen yang menyimpan FFT dari subyek akan disimpan dalam sebuah tabel yang mewakili basis data dari sistem. Dalam realisasi, akan digunakan *Transact-SQL* dengan *Database management system* berupa Microsoft SQL Server.

3.2. Perancangan Perangkat Keras

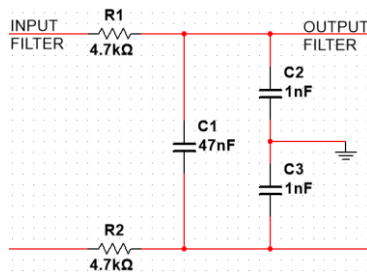
Berikut adalah detail perancangan perangkat lunak untuk realisasi sistem autentikasi dalam tugas akhir ini.

3.2.1. Rangkaian Filter *Radio Frequency Interference*

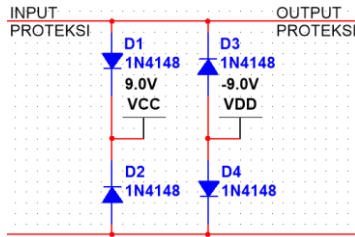
Filter *Radio Frequency Interference* (RFI) direalisasikan dalam konfigurasi *differential low-pass filter*. Filter ini diharapkan dapat menapis semua energi RF. Lebar pita untuk filter RFI ini adalah:

$$BW_{DIFF} = \frac{1}{2 * \pi * 4.7k\Omega * (2 * 47nF + 1nF)} = 360Hz \quad (3.1)$$

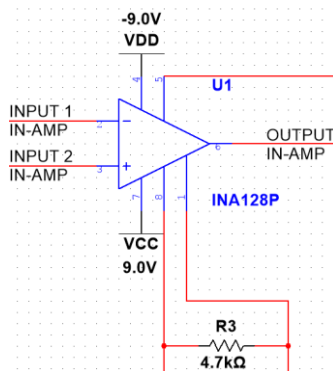
Gambar 3.4 merujuk pada skematik filter RFI.



Gambar 3.4 Filter RFI.



Gambar 3.5 Rangkaian proteksi.



Gambar 3.6 Penguat instrumentasi.

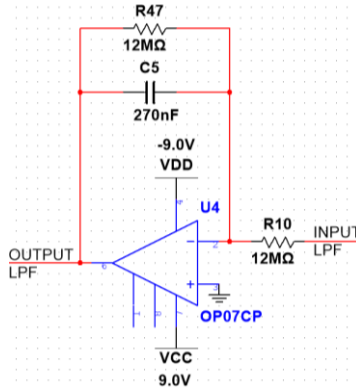
3.2.2. Rangkaian Proteksi

Menggunakan konfigurasi dioda *clipper*, rangkaian ini diharapkan dapat menjaga agar sinyal masukan tetap berada dalam jangkauan tegangan -12V hingga 12V. Spesifikasi resistor yang digunakan adalah 2W. Gambar 3.5 merujuk pada skematik rangkaian proteksi.

3.2.3. Rangkaian Penguat Instrumentasi

Realisasi penguat instrumentasi ini menggunakan IC INA128 yang memiliki konfigurasi *double ended amplifier* dan penguat diferensial. Penguatan yang diberikan penguat instrumentasi sebagai sebuah *preamplifier* adalah sebesar:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{4.7k\Omega} = 11,64 \quad (3.2)$$



Gambar 3.7 Rangkaian penghilang tegangan DC diferensial.

Gambar 3.6 merujuk pada skematik penguat instrumentasi.

3.2.4. Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial

Rangkaian penghilang tegangan DC diferensial ini berupa *low-pass filter* (LPF) yang keluarannya akan diberikan pada terminal referensi pada penguat instrumentasi. Berikut adalah nilai frekuensi *cut-off* dari rangkaian penghilang tegangan DC diferensial:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{int} C_{int}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 33M\Omega \cdot 0,1\mu F} = 0,05Hz \quad (3.3)$$

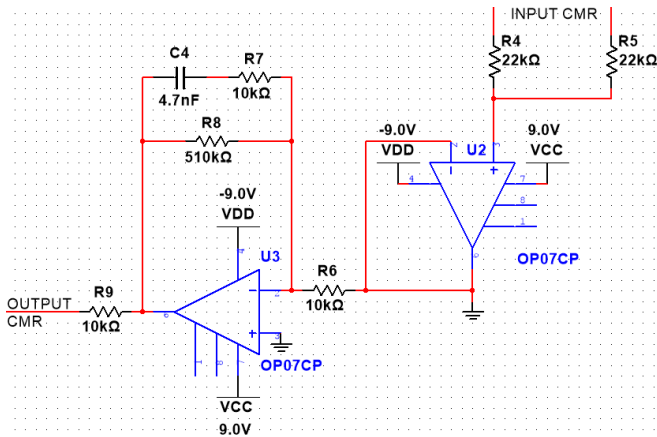
Gambar 3.7 menunjukkan skematik dari rangkaian penghilang tegangan DC diferensial.

3.2.5. Rangkaian *Common-mode Rejection*

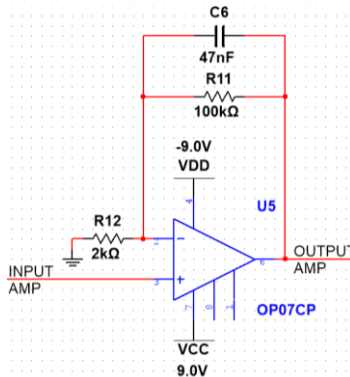
Rangkaian ini terdiri dari dua resistor rata-rata, pembalik, penguat. Dua resistor rata-rata, R4 dan R5, akan terhubung pada R_G pada penguat instrumentasi secara paralel. Berikut adalah penguatan yang diberikan oleh rangkaian CMR dengan lebar pita sebesar 70Hz:

$$|G(s)| = \frac{510k\Omega}{10k\Omega} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 70Hz \cdot 10k\Omega \cdot 4,7nF)^2}} = 50,48 \quad (3.4)$$

Gambar 3.8 menunjukkan skematik dari rangkaian CMR.



Gambar 3.8 Rangkaian CMR.

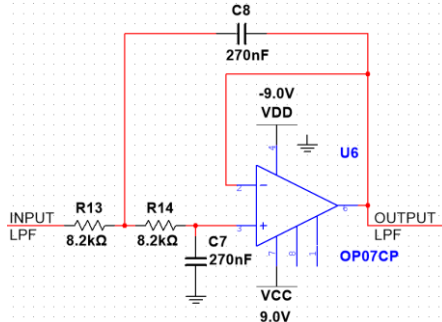


Gambar 3.9 Rangkaian penguat tak membalik.

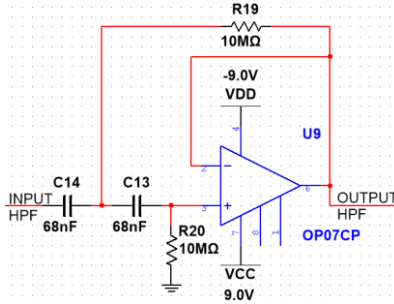
3.2.6. Rangkaian Penguat Tak Membalik

Rangkaian penguat tak membalik yang dirancang dapat menguatkan tegangan tanpa membalik polaritas dengan dilengkapi *low-pass filter* (LPF). Penguatan yang diberikan oleh rangkaian ini adalah sebesar:

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{100\text{k}\Omega}{2\text{k}\Omega} = 51 \quad (3.5)$$



Gambar 3.10 Rangkaian LPF orde 2.



Gambar 3.11 Rangkaian HPF orde 2.

Frekuensi *cut-off* dari rangkaian tersebut adalah sebesar:

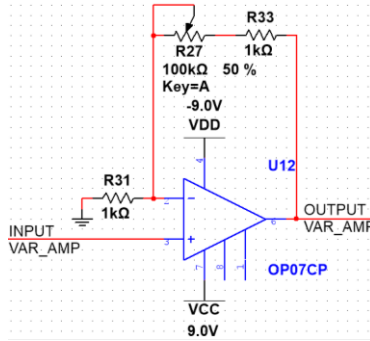
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} = \frac{1}{2 * \pi * 100k\Omega * 47nF} = 33,86Hz \quad (3.6)$$

Gambar 3.9 menunjukkan skematik dari rangkaian penguat tak membalik.

3.2.7. Rangkaian *Low-pass Filter*

Low-pass Filter (LPF) orde 6 yang digunakan diperoleh dengan melakukan *cascading* tiga buah LPF orde 2. Frekuensi *cut-off* dari LPF tersebut adalah:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{270nF * 270nF * 8,2k\Omega * 8,2k\Omega}} = 72Hz \quad (3.7)$$



Gambar 3.12 Rangkaian penguat variabel.

Gambar 3.10 menunjukkan skematik dari LPF orde 2.

3.2.8. Rangkaian *High-pass Filter*

High-pass Filter (HPF) orde 6 yang digunakan diperoleh dengan melakukan *cascading* tiga buah HPF orde 2. Frekuensi *cut-off* dari HPF tersebut adalah:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{68\text{nF} \cdot 68\text{nF} \cdot 10\text{M}\Omega \cdot 10\text{M}\Omega}} = 0,23\text{Hz} \quad (3.8)$$

Gambar 3.11 menunjukkan skematik dari HPF orde 2.

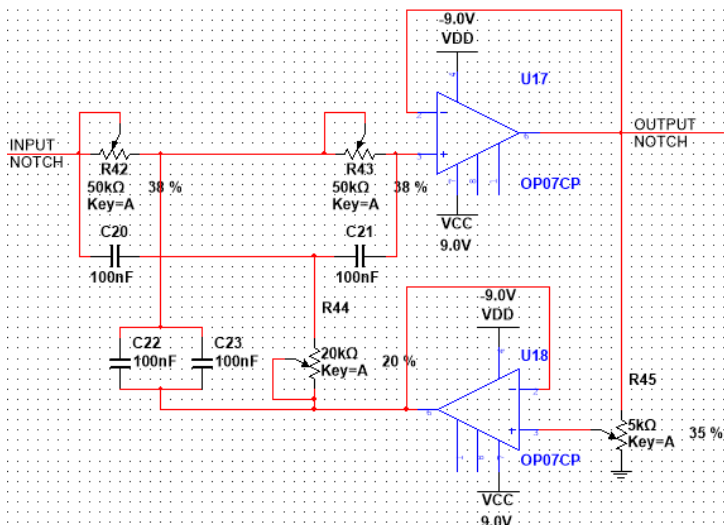
3.2.9. Rangkaian Penguat Variabel

Penguat variabel ini berfungsi sebagai penguat dengan nilai penguatan yang dapat diatur-atu agar dapat menyesuaikan rentang masukan *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Penguatan yang diberikan oleh rangkaian ini adalah sebesar:

$$G_{\text{minimum}} = 1 + \frac{1\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} = 1 + 1 = 2 \quad (3.9)$$

$$G_{\text{maksimum}} = 1 + \frac{100\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} = 1 + 100 = 101 \quad (3.10)$$

Gambar 3.12 menunjukkan skematik dari penguat variabel.



Gambar 3.13 Rangkaian *notch filter*.

3.2.10. Rangkaian Notch Filter

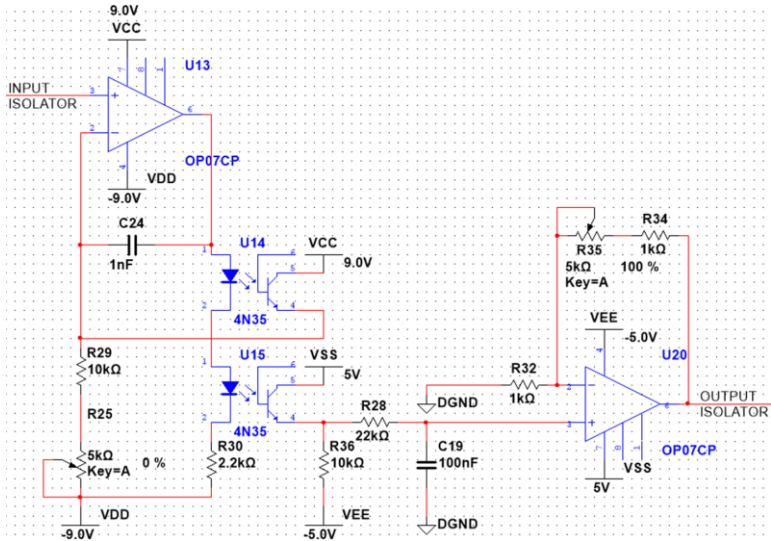
Notch filter berfungsi untuk meredam sinyal dengan frekuensi 50Hz. Topologi yang digunakan sebagai *notch filter* adalah Twin T. Frekuensi resonansi dari *notch filter* tersebut adalah:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 31,83k\Omega \cdot 100nF} = 50Hz \quad (3.11)$$

Untuk memperoleh nilai resistor yang sesuai, maka digunakan resistor variabel. Gambar 3.13 menunjukkan skematik dari *notch filter*.

3.2.11. Rangkaian Isolasi

Rangkaian isolasi berfungsi untuk mengurangi interferensi sinyal 50Hz dan mengisolasi pasien dari peralatan yang terhubung dengan suplai daya komersial. Desain tersebut memanfaatkan transmisi optik dari *optocoupler* sebagai pengisolasi elektrik antara kedua rangkaian. Rangkaian isolator juga dilengkapi dengan *low-pass filter* orde satu dengan frekuensi *cut-off*:



Gambar 3.14 Rangkaian isolasi.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 22k\Omega \cdot 100nF} = 72Hz \quad (3.12)$$

Rangkaian ini juga memiliki sebuah penguat dengan penguatan sebesar:

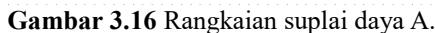
$$G_{\text{minimum}} = 1 + \frac{1k\Omega}{1k\Omega} = 1 + 1 = 2 \quad (3.13)$$

$$G_{\text{maksimum}} = 1 + \frac{5k\Omega}{1k\Omega} = 1 + 5 = 6 \quad (3.14)$$

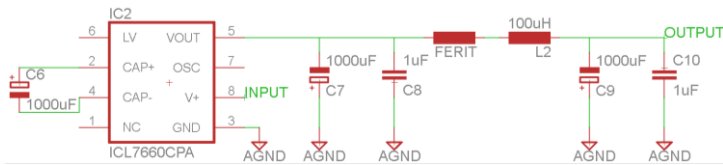
Gambar 3.14 menunjukkan skematik dari rangkaian isolasi.

3.2.12. Rangkaian Adder

Adder merupakan rangkaian yang digunakan untuk memberikan *offset* DC pada sinyal EEG, sehingga sinyal tersebut berada di dalam rentang 0-5V alias *rail-to-rail input*. Gambar 3.15 menunjukkan skematik dari adder.



Rangkaian suplai daya yang digunakan terbagi menjadi dua: suplai daya A untuk blok rangkaian sebelum rangkaian isolasi yang bersumber dari jalur daya komersial dan suplai daya B untuk blok rangkaian sesudah rangkaian isolasi yang bersumber dari tegangan yang berasal dari *Personal Computer* (PC). Suplai daya A menggunakan transformator *center-tapped* yang digunakan untuk menghasilkan suplai daya simetris. Gambar 3.16 menunjukkan skematik dari suplai daya A. Suplai daya B menggunakan ICL7660 untuk melakukan konversi tegangan 5V yang diperoleh dari PC menjadi tegangan -5V. Gambar 3.17 menunjukkan skematik dari suplai daya B.



Gambar 3.17 Rangkaian suplai daya B.

3.3. Perancangan Perangkat Lunak

Berikut adalah detail perancangan perangkat lunak untuk realisasi sistem autentikasi dalam tugas akhir ini.

3.3.1. Arduino

Arduino akan melakukan komunikasi dengan *Analog-to-Digital Converter* (ADC), yaitu ADS1115 dan juga dengan *Personal Computer* (PC). Terhadap ADC, pengontrol mikro ini akan melakukan pengaturan agar akuisisi yang dilakukan oleh ADS1115 memiliki frekuensi 64Hz. Data pembacaan tegangan oleh ADS1115 akan dikirim ke PC melalui serangkaian *line* yang dikirim via SerialPort.

3.3.2. SerialPort

Menggunakan *namespace* System.IO.Ports, kelas SerialPort digunakan untuk melakukan komunikasi antara Arduino Nano dan *Personal Computer* (PC). Program yang dibuat harus dapat mengenali *Vendor ID* (VID) dan *Product ID* (PID) dari produk Arduino Nano yang digunakan, yaitu 1A86 dan 7523 secara berurutan. Berikut adalah pengaturan SerialPort yang harus diatur apabila komunikasi antar-kedua perangkat ingin dilakukan: kecepatan baud sebesar 115.200 bps, dan *read* dan *write timeout* selama 16 detik. Proses akuisisi yang dilakukan adalah selama 30 detik.

3.3.3. Filter Digital

Terdapat dua filter digital yang digunakan dalam perangkat lunak di PC: *Low-pass Filter* (LPF) Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* sebesar 14Hz dan *High-pass Filter* (HPF) Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* sebesar 4Hz. Berikut adalah persamaan yang akan digunakan untuk LPF:

$$y[index] = \text{new Complex}((1a * x[index].\text{Real} + 1b * x[index - 1].\text{Real} + 1c * x[index - 2].\text{Real} + 1d * x[index - 3].\text{Real} -$$

```
le * y[index - 1].Real - lf * y[index - 2].Real - lg *
y[index - 3].Real) / lh, 0);
```

dengan

```
public static double omegaLpf = 2 * Math.PI * 14;
public static double la = Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
public static double lb = 3 * Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts,
3);
public static double lc = 3 * Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts,
3);
public static double ld = Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
public static double le = -24 - 8 * omegaLpf * ts + 4 *
Math.Pow(omegaLpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) + 3 *
Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
public static double lf = 24 - 8 * omegaLpf * ts - 4 *
Math.Pow(omegaLpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) + 3 *
Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
public static double lg = -8 + 8 * omegaLpf * ts - 4 *
Math.Pow(omegaLpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) +
Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
public static double lh = 8 + 8 * omegaLpf * ts + 4 *
Math.Pow(omegaLpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) +
Math.Pow(omegaLpf, 3) * Math.Pow(ts, 3);
```

Berikut adalah persamaan yang akan digunakan untuk HPF:

```
y[index] = new Complex((ha * x[index].Real - hb * x[index -
1].Real + hc * x[index - 2].Real - hd * x[index - 3].Real -
he * y[index - 1].Real - hf * y[index - 2].Real - hg *
y[index - 3].Real) / hh, 0);
```

dengan

```
public static double omegaHpf = 2 * Math.PI * 4;
public static double ha = 8;
public static double hb = 24;
public static double hc = 24;
public static double hd = 8;
public static double he = 3 * Math.Pow(omegaHpf, 3) * Math.Pow(ts,
3) + 4 * Math.Pow(omegaHpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) - 8 *
omegaHpf * ts - 24;
public static double hf = 3 * Math.Pow(omegaHpf, 3) * Math.Pow(ts,
3) - 4 * Math.Pow(omegaHpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) - 8 *
omegaHpf * ts + 24;
public static double hg = Math.Pow(omegaHpf, 3) * Math.Pow(ts, 3)
```

```

- 4 * Math.Pow(omegaHpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) + 8 *
omegaHpf * ts - 8;
public static double hh = Math.Pow(omegaHpf, 3) * Math.Pow(ts, 3)
+ 4 * Math.Pow(omegaHpf, 2) * Math.Pow(ts, 2) + 8 *
omegaHpf * ts + 8;

```

3.3.4. *Window*

Dalam perangkat lunak, *window* Hamming direalisasikan dalam persamaan sebagai berikut:

```

y[index] = new Complex((0.54 - 0.46 * Math.Cos((2 * Math.PI * index)
/ (eegPoints - 1))) * x[index].Real, 0);

```

3.3.5. *Fast Fourier Transform*

Dengan adanya proses akuisisi yang dilakukan selama 30 detik dengan frekuensi akuisisi sebesar 64Hz, maka akan diperoleh 1920 data. Dalam proses *Fast Fourier Transform*, sebanyak 2.048 data akan diekstrak fiturnya dengan 1920 merupakan data dari proses akuisisi dan sisanya merupakan nilai 0. Menggunakan Accord.Math, proses ekstraksi fitur spektrum frekuensi dapat dilakukan.

3.3.6. *Data-binning* dan Normalisasi

Proses *data-binning* akan terbagi menjadi tiga, yaitu dengan 1.024 bin, 128 bin, dan 64 bin. Untuk realisasi 1.024 bin, tidak ada tindakan tambahan yang dilakukan, karena jumlah data yang dihasilkan adalah sama dengan jumlah bin. Dalam realisasi 128 bin, setiap data akan dikelompokkan dengan lebar pita sebesar 0,5Hz. Data yang telah dikelompokkan akan dirata-rata dan dinormalisasi. Hal serupa juga dilakukan pada 64 bin dengan lebar pita sebesar 1Hz.

3.3.7. Pembelajaran Mesin

Proses pembelajaran mesin akan terbagi menjadi dua.

- Mesin Vektor Pendukung
Jenis pembelajaran mesin yang digunakan adalah Mesin Vektor Pendukung multi-kelas. Mesin ini direalisasikan menggunakan Accord.MachineLearning.
- Jaringan Syaraf Tiruan
Jumlah neuron pada pembelajaran mesin ini divariasikan, yaitu 10, 100, dan 1000 neuron dengan masing-masing mesin memiliki batas iterasi yang divariasikan pula, yaitu 1e4, 100.000,

dan 1.000.000. Mesin ini direalisasikan menggunakan Accord.Neuro.

3.3.8. Basis Data

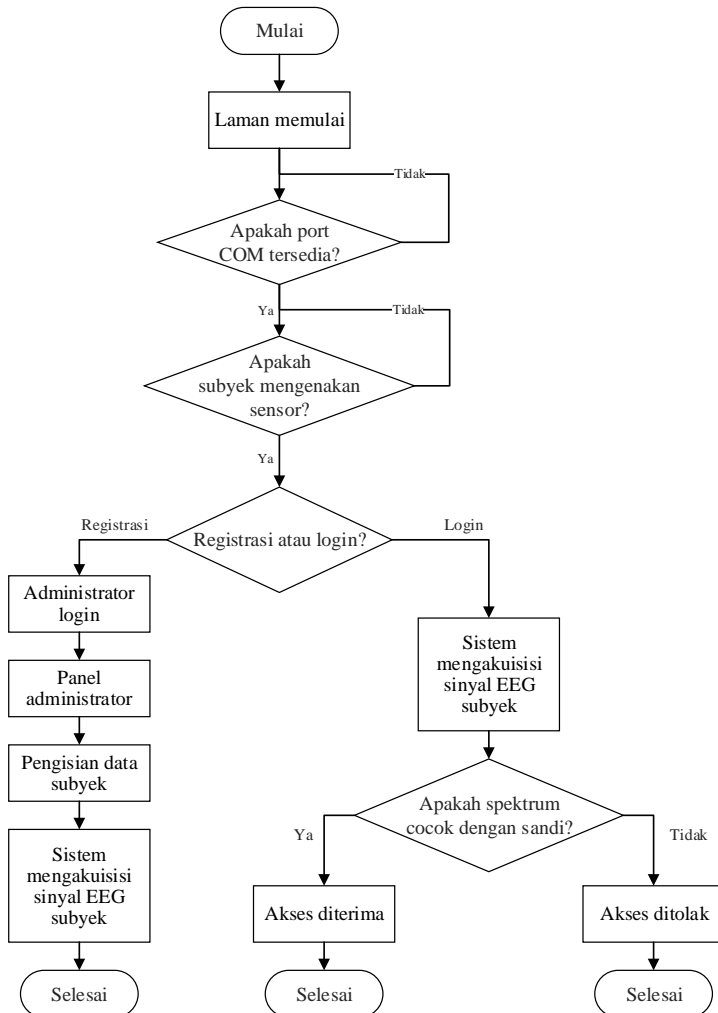
Menggunakan *Transact-SQL* (T-SQL) pada Microsoft SQL Server, program akan menyimpan beberapa hal yang diperlukan agar sistem autentikasi dapat berjalan.

- Nama
Dalam proses registrasi, subyek diwajibkan untuk mengisi ‘nama’ untuk menjadi informasi identitas bagi subyek.
- Kata sandi
Serupa dengan ‘nama’, subyek akan mengisi ‘kata sandi’ dalam proses registrasi. Kata sandi digunakan untuk menambah modalitas dalam sistem autentikasi biometrik EEG.
- Nama dokumen
Setelah melakukan registrasi, maka semua data akan disimpan ke dalam sumber daya program. Untuk mengingat nama dokumen tempat penyimpanan data tersebut, maka nama dokumen akan diingat dalam T-SQL.

3.3.9. Desain Program Antar-muka

Setelah diketahui jenis pembelajaran mesin yang akan digunakan, maka akan dirancang sebuah sistem antar-muka yang dapat menjalankan keseluruhan sistem yang dapat digunakan oleh khalayak umum. Gambar 3.16 menunjukkan diagram alur dari antar-muka sistem autentikasi. Desain program antar-muka dari sistem yang dirancang memiliki beberapa laman:

- Memulai
Pada laman ini, subyek akan diberi perintah untuk mengikuti serangkaian instruksi yang akan diberikan melalui program.
- Ketersediaan Port COM
Setelah laman memulai, subyek akan dibawa ke laman Port COM yang digunakan untuk mengetahui perihal ketersediaan Arduino Nano yang terhubung dengan *Personal Computer* (PC).
- Instalasi EEG
Pada tahap ini, subyek akan diberi instruksi untuk mengenakan sensor EEG dengan tepat dan menghubungkannya ke perangkat keras instrumentasi EEG.



Gambar 3.18 Diagram alur desain antar-muka sistem.

- **Registrasi**

Pada laman ini, subyek dipastikan memiliki intensi untuk melakukan registrasi. Apabila ingin melakukan registrasi, maka subyek harus bersama administrator untuk dapat mengakses laman

login untuk administrator. Setelah itu, administrator dapat melakukan kelola data berbasis *Transact-SQL* untuk melakukan manipulasi basis data. Setelah menutup panel administrator, maka subyek dapat mengisi data diri di laman registrasi dan memulai sekuens akuisisi sinyal EEG.

- *Login*

Subyek dipastikan memiliki intensi untuk melakukan *login* apabila memasuki laman ini. Pada laman ini, sistem akan secara langsung mengakuisisi sinyal EEG. Apabila hasil ekstraksi sinyal EEG dari subyek cocok dengan sandi yang diberikan subyek, maka subyek akan dibawa ke laman penerimaan akses. Apabila didapati ketidakcocokan, maka subyek akan dibawa ke laman penolakan akses.

3.4. Subyek dan Prosedur Perekaman Sinyal EEG

Berikut adalah keterangan lanjut perihal subyek yang menjadi partisipan dalam proses realisasi sistem autentikasi elektroensefalografi (EEG) dan prosedur yang dilakukan dalam perekaman sinyal EEG.

3.4.1 Subyek

Subyek dalam prosedur perekaman ini berusia 18-22 tahun dan tidak memiliki gangguan otot mata. Proses perekaman dilakukan dengan kondisi subyek duduk relaks di atas kursi di depan layar monitor yang berisi serangkaian instruksi yang harus dipatuhi oleh subyek. Apabila terdapat instruksi memejamkan mata, maka subyek diwajibkan untuk memejamkan mata dalam rangka meningkatkan sinyal alfa yang dihasilkan oleh otak. Perekaman dilakukan selama 30 detik.

3.4.2 Prosedur Perekaman Sinyal EEG

Akuisisi sinyal EEG dilakukan menggunakan elektroda jenis diska emas yang dapat digunakan kembali dan elektroda jenis Ag/AgCl *pregelled* yang digunakan sekali pakai. Untuk melakukan akuisisi sinyal alfa, akan digunakan konfigurasi yang berbeda untuk masing-masing elektroda. Elektroda diska emas menggunakan konfigurasi Oz untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan Fpz untuk *common-mode*. Elektroda Ag/AgCl menggunakan konfigurasi Fp2 untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan A2 untuk *common-mode*. Gambar 3.19 dan Gambar 3.20 menunjukkan demonstrasi konfigurasi elektroda.



Gambar 3.19 Konfigurasi Oz untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan Fpz untuk *common-mode*.



Gambar 3.20 Konfigurasi Fp2 untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan A2 untuk *common-mode*.

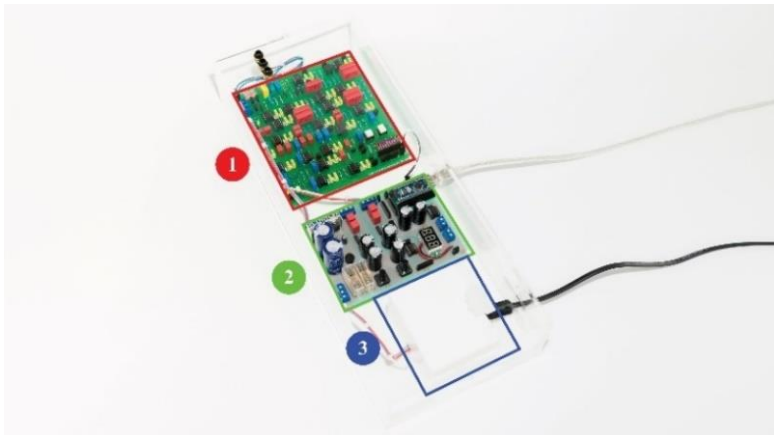
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini dijelaskan mengenai hasil pengujian dan analisis sistem. Pengujian akan dilakukan pada komponen perangkat keras, lunak, dan integrasinya. Pengujian perangkat keras dilakukan dengan mengamati relasi tegangan masukan-keluaran. Pengujian perangkat lunak dilakukan dengan menguji beberapa algoritma vital dalam ekstraksi fitur. Kemudian, dilakukan analisis data dengan melakukan perbandingan sistem untuk mengetahui jenis elektroda dan pembelajaran mesin yang optimum.

4.1. Pengujian Perangkat Keras

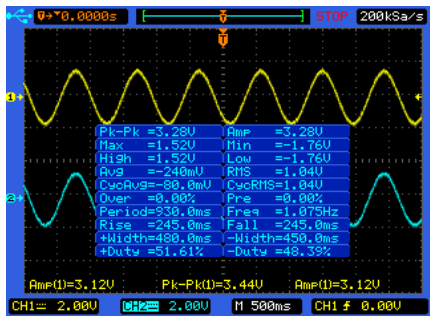
Gambar 4.1 menunjukkan hasil akhir dari perangkat keras yang akan diuji. Pada gambar tersebut, nomor 1 menunjukkan bagian rangkaian akuisisi sinyal elektroensefalografi, mulai dari rangkaian filter *Radio Frequency Interference* hingga rangkaian *adder*. Nomor 2 menunjukkan bagian suplai daya: rangkaian suplai daya A untuk blok rangkaian sebelum rangkaian isolasi dan rangkaian suplai daya B untuk blok rangkaian sesudah rangkaian isolasi. Nomor 3 menunjukkan bagian transformator *center-tapped*. Pada keseluruhan citra osiloskop, sinyal kuning mewakili sinyal masukan dan sinyal biru mewakili sinyal keluaran.



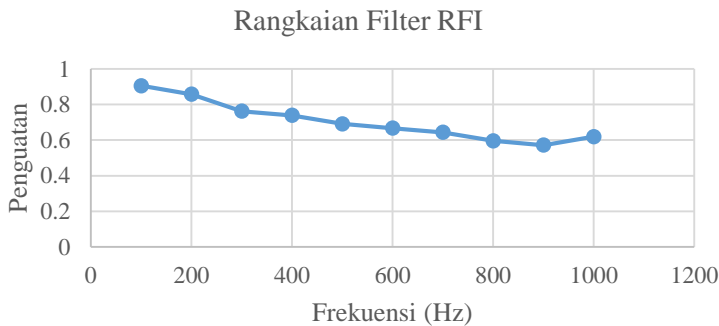
Gambar 4.1 Perangkat keras sistem autentikasi.

4.1.1. Pengujian Rangkaian Filter Radio Frequency Interference

Pengujian rangkaian filter *Radio Frequency Interference* (RFI) dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 3.360mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 100Hz hingga 1kHz dengan kenaikan 100Hz. Gambar 4.2 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.3 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada filter RFI. Tabel 4.1 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh filter RFI. Terlihat bahwa rangkaian RFI tersebut sudah dapat menapis sinyal pada 300Hz dengan penguatan sebesar 0,76x. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian filter RFI dapat bekerja dengan baik.



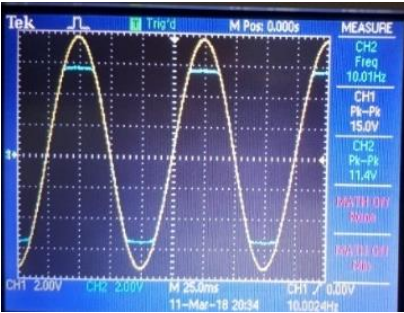
Gambar 4.2 Citra osiloskop dalam pengujian rangkaian filter RFI.



Gambar 4.3 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada filter RFI.

Tabel 4.1 Pengujian rangkaian filter RFI.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mV _{pp} AC) | V _{out} (mV _{pp} AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------------------|--|-----------|
| 100 | 3.360 | 3.040 | 0,91 |
| 200 | 3.360 | 2.880 | 0,86 |
| 300 | 3.360 | 2.560 | 0,76 |
| 400 | 3.360 | 2.480 | 0,74 |
| 500 | 3.360 | 2.320 | 0,69 |
| 600 | 3.360 | 2.240 | 0,67 |
| 700 | 3.360 | 2.160 | 0,64 |
| 800 | 3.360 | 2.000 | 0,60 |
| 900 | 3.360 | 1.920 | 0,57 |
| 1.000 | 3.360 | 2.080 | 0,62 |



Gambar 4.4 Citra osiloskop dalam pengujian rangkaian proteksi.

4.1.2. Pengujian Rangkaian Proteksi

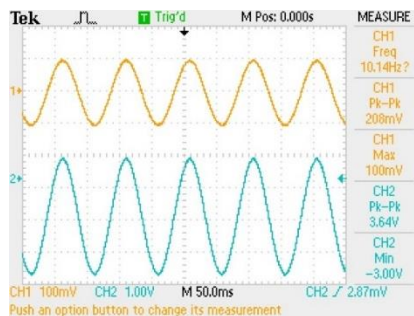
Pengujian rangkaian proteksi dilakukan dengan memberikan tegangan masukan sebesar 960mV_{pp} AC hingga 16V_{pp} AC. Kami berharap bahwa tegangan keluaran tidak melebihi suplai daya yang diberikan, yaitu 12,11V DC. Gambar 4.4 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Tabel 4.2 merujuk pada pengamatan tegangan masukan dan tegangan keluaran. Terlihat bahwa mulai tegangan masukan 11V_{pp} AC, tegangan keluaran dari rangkaian masih berada dalam jangkauan suplai daya (berkisar di tegangan 11V_{pp} AC). Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian proteksi dapat bekerja dengan baik.

4.1.3. Pengujian Rangkaian Penguat Instrumentasi

Pengujian penguat instrumentasi dilakukan dengan memberikan

Tabel 4.2 Pengujian rangkaian proteksi.

| V_{in} (mV _{pp} AC) | V_{out} (mV _{pp} AC) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 960 | 960 |
| 2.080 | 2.080 |
| 3.120 | 3.020 |
| 3.960 | 3.920 |
| 5.000 | 4.960 |
| 6.080 | 6.040 |
| 7.240 | 7.200 |
| 8.160 | 8.080 |
| 9.040 | 8.880 |
| 10.400 | 10.300 |
| 11.000 | 10.700 |
| 11.900 | 11.400 |
| 12.100 | 11.200 |
| 12.900 | 11.600 |
| 13.800 | 11.500 |
| 15.000 | 11.600 |
| 16.000 | 12.000 |

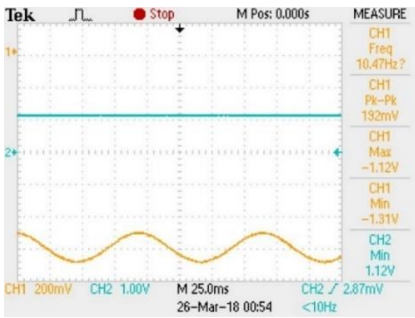


Gambar 4.5 Citra osiloskop dalam pengujian penguat instrumentasi.

tegangan sebesar 200mV_{pp} AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.5 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Tabel 4.3 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh penguat instrumentasi. Terlihat bahwa rangkaian penguat instrumentasi memberi-

Tabel 4.3 Pengujian rangkaian penguat instrumentasi.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mVpp AC) | V _{out} (mVpp AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| 10 | 208 | 3.640 | 17,50 |
| 20 | 204 | 3.640 | 17,84 |
| 30 | 204 | 3.640 | 17,84 |
| 40 | 204 | 3.640 | 17,84 |
| 50 | 212 | 3.640 | 17,17 |
| 60 | 208 | 3.600 | 17,31 |
| 70 | 208 | 3.640 | 17,50 |
| 80 | 212 | 3.640 | 17,17 |
| 90 | 204 | 3.600 | 17,65 |
| 100 | 208 | 3.640 | 17,50 |
| Rata-rata | | | 17,53 |



Gambar 4.6 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penghilang tegangan DC diferensial.

kan penguatan dengan nilai rata-rata sebesar 17,53x. Ekspektasi penguatan dari rangkaian ini adalah 11,64x. Tingginya penguatan yang diberikan akan ditoleransi oleh penguat variabel.

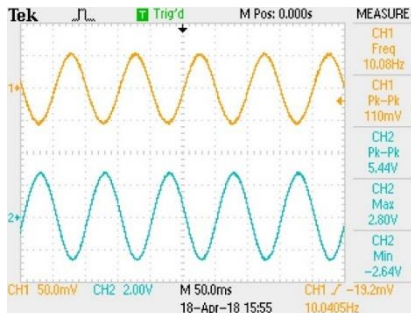
4.1.4. Pengujian Rangkaian Penghilang Tegangan DC Diferensial

Pengujian rangkaian penghilang tegangan DC diferensial dilakukan dengan memberikan tegangan masukan AC sebesar 192mVpp dengan *offset* DC positif sebesar 1.200mVpp dan juga *offset* DC negatif sebesar -1.214mVpp. Kemudian, dilakukan pengamatan terhadap terminal keluaran. Dengan adanya rangkaian ini, diharapkan tegangan keluaran

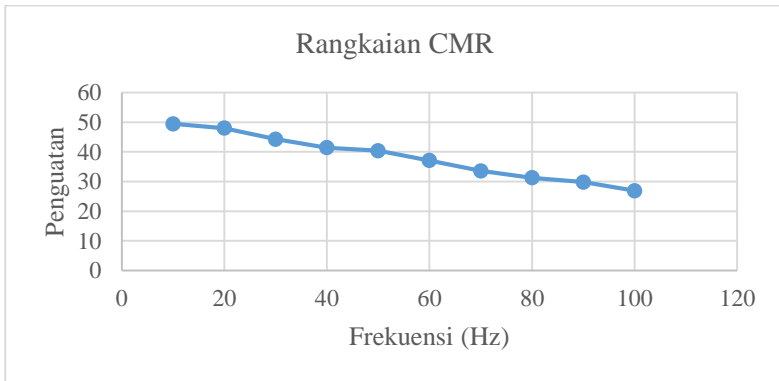
dari rangkaian ini hanya menyisakan *offset* DC saja. Gambar 4.6 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Tabel 4.4 merujuk pada pengamatan tegangan masukan dan tegangan keluaran. Terlihat pada Gambar 4.6 bahwa tegangan keluaran (warna biru) hanya berupa tegangan DC saja, tanpa menyisakan tegangan AC. Selain itu, apabila diberi tegangan masukan positif, maka tegangan keluarannya adalah kebalikannya. Hal ini tentu akan berguna pada rangkaian penguat instrumentasi untuk mengurangi tegangan DC pada proses penguatan.

Tabel 4.4 Pengujian rangkaian penghilang tegangan DC diferensial.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mVmax DC) | V _{out} (mVmax DC) |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Tegangan Masukan Positif | | |
| 10 | 1.200 | -1.280 |
| 20 | 1.200 | -1.280 |
| 30 | 1.200 | -1.280 |
| 40 | 1.200 | -1.280 |
| 50 | 1.200 | -1.280 |
| 60 | 1.200 | -1.280 |
| 70 | 1.200 | -1.280 |
| 80 | 1.200 | -1.280 |
| 90 | 1.200 | -1.280 |
| 100 | 1.200 | -1.280 |
| Tegangan Masukan Negatif | | |
| 10 | -1.215 | 1.120 |
| 20 | -1.215 | 1.120 |
| 30 | -1.215 | 1.120 |
| 40 | -1.215 | 1.120 |
| 50 | -1.215 | 1.120 |
| 60 | -1.215 | 1.120 |
| 70 | -1.215 | 1.120 |
| 80 | -1.215 | 1.120 |
| 90 | -1.215 | 1.120 |
| 100 | -1.215 | 1.120 |



Gambar 4.7 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian CMR.



Gambar 4.8 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada CMR.

Tabel 4.5 Pengujian rangkaian CMR.

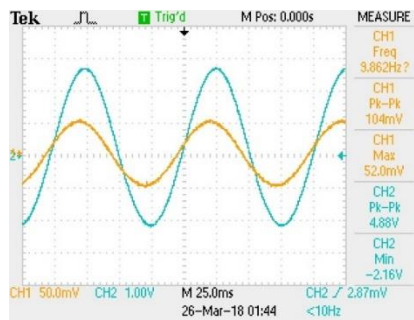
| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mV _{pp} AC) | V _{out} (mV _{pp} AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------------------|--|-----------|
| 10 | 110 | 5.440 | 49,46 |
| 20 | 110 | 5.280 | 48,00 |
| 30 | 112 | 4.960 | 44,29 |
| 40 | 112 | 4.640 | 41,43 |
| 50 | 110 | 4.440 | 40,36 |
| 60 | 110 | 4.080 | 37,09 |
| 70 | 112 | 3.760 | 33,57 |
| 80 | 110 | 3.440 | 31,27 |
| 90 | 110 | 3.280 | 29,82 |
| 100 | 110 | 2.960 | 26,91 |

4.1.5. Pengujian Rangkaian *Common-mode Rejection*

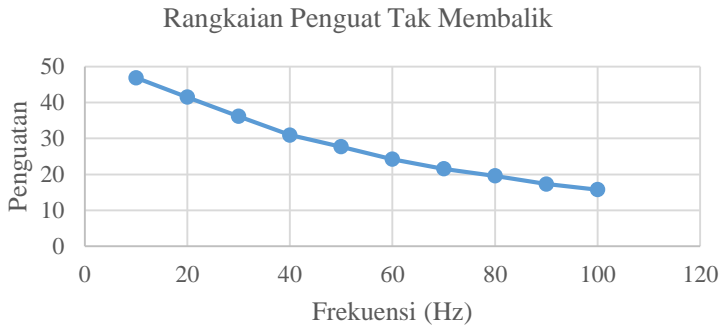
Pengujian rangkaian *common-mode rejection* (CMR) dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 110mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.7 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.8 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada CMR. Tabel 4.5 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian CMR. Terlihat bahwa rangkaian CMR dapat memberikan penguatan dengan nilai maksimum sebesar 49,46x. Ekspektasi maksimum terhadap penguatan dari rangkaian ini adalah 50,48x. Rangkaian CMR berfungsi dengan baik dengan error 2,04%.

4.1.6. Pengujian Rangkaian Penguat Tak Membalik

Pengujian rangkaian penguat tak membalik dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 104mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.9 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.10 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada penguat tak membalik. Tabel 4.6 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian penguat tak membalik. Terlihat bahwa rangkaian penguat tak membalik dapat memberikan penguatan dengan nilai maksimum sebesar 46,92x. Ekspektasi maksimum terhadap penguatan dari rangkaian ini adalah 51x. Rendahnya penguatan yang diberikan akan ditoleransi penguat variabel.



Gambar 4.9 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penguat tak membalik.



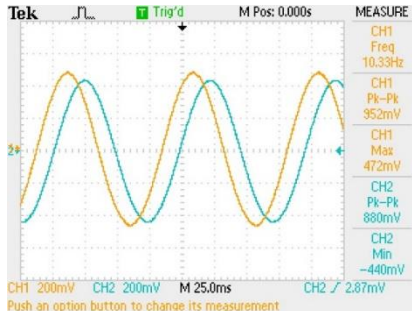
Gambar 4.10 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada penguat tak membalik.

Tabel 4.6 Pengujian rangkaian penguat tak membalik.

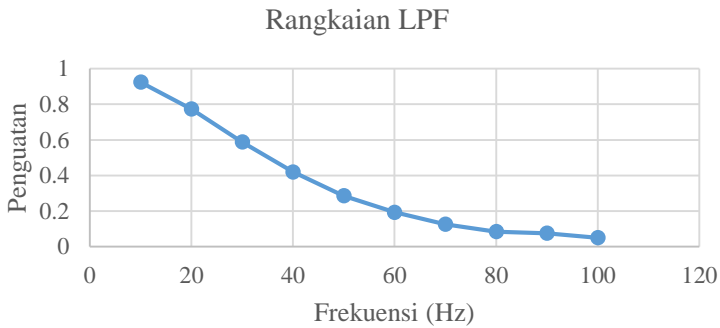
| Frekuensi (Hz) | V_{in} (mVpp AC) | V_{out} (mVpp AC) | Penguatan |
|----------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 10 | 104 | 4.880 | 46,92 |
| 20 | 106 | 4.400 | 41,51 |
| 30 | 104 | 3.760 | 36,15 |
| 40 | 106 | 3.280 | 30,94 |
| 50 | 104 | 2.880 | 27,69 |
| 60 | 104 | 2.520 | 24,23 |
| 70 | 102 | 2.200 | 21,57 |
| 80 | 102 | 2.000 | 19,61 |
| 90 | 104 | 1.800 | 17,31 |
| 100 | 104 | 1.640 | 15,77 |

4.1.7. Pengujian Rangkaian *Low-pass Filter*

Pengujian rangkaian *low-pass filter* (LPF) dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 952mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.11 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.12 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada LPF. Tabel 4.7 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian LPF. Terlihat bahwa rangkaian LPF memiliki penguatan sebesar 0,77x pada saat tegangan masukan memiliki frekuensi 20Hz dan melewatkan tegangan masuk di bawahnya.



Gambar 4.11 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian LPF.



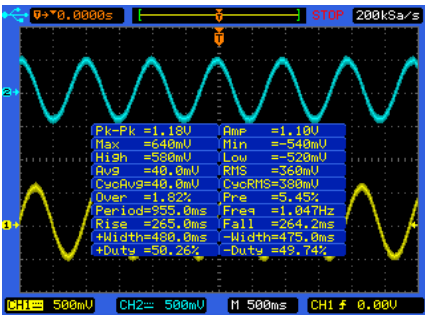
Gambar 4.12 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada LPF.

Tabel 4.7 Pengujian rangkaian LPF.

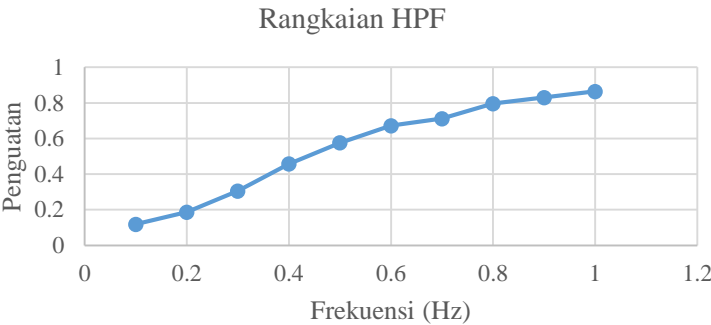
| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mV _{pp} AC) | V _{out} (mV _{pp} AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------------------|--|-----------|
| 10 | 952 | 880 | 0,92 |
| 20 | 952 | 736 | 0,77 |
| 30 | 952 | 560 | 0,59 |
| 40 | 952 | 400 | 0,42 |
| 50 | 952 | 272 | 0,29 |
| 60 | 952 | 184 | 0,19 |
| 70 | 952 | 120 | 0,13 |
| 80 | 952 | 80 | 0,08 |
| 90 | 952 | 72 | 0,08 |
| 100 | 952 | 48 | 0,05 |

4.1.8. Pengujian Rangkaian *High-pass Filter*

Pengujian rangkaian *high-pass filter* (HPF) dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 1.180mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.13 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.14 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada LPF. Tabel 4.8 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian HPF. Terlihat bahwa rangkaian HPF memiliki penguatan sebesar 0,71x pada saat tegangan masukan memiliki frekuensi 0,7Hz dan melewati tegangan masukan di atasnya.



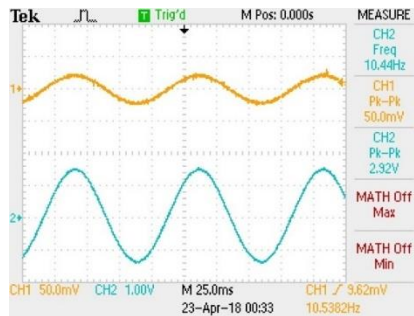
Gambar 4.13 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian HPF.



Gambar 4.14 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada HPF.

Tabel 4.8 Pengujian rangkaian HPF.

| Frekuensi (Hz) | V_{in} (mVpp AC) | V_{out} (mVpp AC) | Penguatan |
|----------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 0,1 | 1.180 | 140 | 0,19 |
| 0,2 | 1.180 | 220 | 0,19 |
| 0,3 | 1.180 | 360 | 0,31 |
| 0,4 | 1.180 | 540 | 0,46 |
| 0,5 | 1.180 | 680 | 0,58 |
| 0,6 | 1.160 | 780 | 0,67 |
| 0,7 | 1.180 | 840 | 0,72 |
| 0,8 | 1.180 | 940 | 0,80 |
| 0,9 | 1.180 | 980 | 0,84 |
| 1 | 1.180 | 1.020 | 0,87 |



Gambar 4.15 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian penguat variabel.

4.1.9. Pengujian Rangkaian Penguat Variabel

Pengujian rangkaian penguat variabel dilakukan sebanyak dua kali. Pertama, dilakukan pengujian untuk kondisi penguatan minimum dengan tegangan masukan sebesar 208mVpp AC dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Kedua, dilakukan pengujian untuk kondisi penguatan maksimum dengan tegangan masukan sebesar 52mVpp AC dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan variasi frekuensi yang sama. Gambar 4.14 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Tabel 4.9 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian penguat variabel. Terlihat bahwa rangkaian penguat variabel dapat memberikan penguatan

minimum dengan nilai rata-rata sebesar 2,02x dan penguatan maksimum dengan nilai rata-rata sebesar 89,67x. Ekspektasi penguatan minimum dari rangkaian ini adalah 2x dan penguatan maksimum sebesar 101x. Dengan eror sebesar 0,79% untuk penguatan minimum dan 11,22% untuk penguatan maksimum, penguatan variabel ini masih dapat bekerja sebagaimana mestinya.

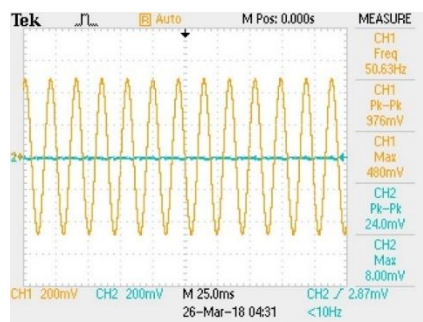
4.1.10. Pengujian Rangkaian *Notch Filter*

Pengujian rangkaian *notch filter* dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 984mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan fre-

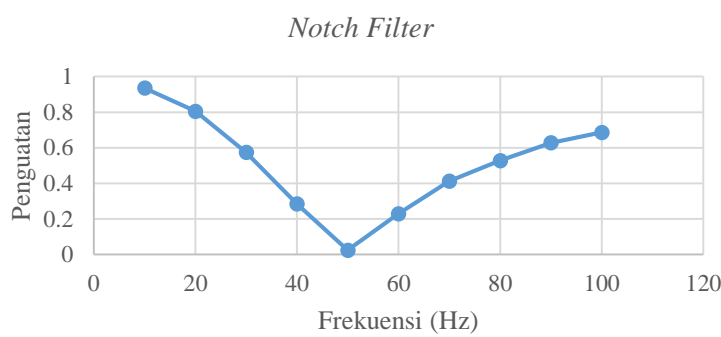
Tabel 4.9 Pengujian rangkaian penguat variabel.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mVpp AC) | V _{out} (mVpp AC) | Penguatan |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| Penguatan Minimum | | | |
| 10 | 208 | 416 | 2,00 |
| 20 | 204 | 408 | 2,00 |
| 30 | 204 | 424 | 2,08 |
| 40 | 208 | 408 | 1,96 |
| 50 | 204 | 412 | 2,02 |
| 60 | 204 | 420 | 2,06 |
| 70 | 208 | 416 | 2,00 |
| 80 | 204 | 412 | 2,02 |
| 90 | 204 | 412 | 2,02 |
| 100 | 208 | 416 | 2,00 |
| Rata-rata | | | 2,02 |
| Penguatan Maksimum | | | |
| 10 | 52 | 4.600 | 88,46 |
| 20 | 52 | 4.600 | 88,46 |
| 30 | 52 | 4.640 | 89,23 |
| 40 | 52 | 4.600 | 88,46 |
| 50 | 48 | 4.640 | 96,67 |
| 60 | 52 | 4.640 | 89,23 |
| 70 | 52 | 4.640 | 89,23 |
| 80 | 52 | 4.640 | 89,23 |
| 90 | 52 | 4.640 | 89,23 |
| 100 | 52 | 4.600 | 88,46 |
| Rata-rata | | | 89,67 |

kuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.16 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.17 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada *notch filter*. Tabel 4.10 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian *notch filter*. Terlihat bahwa rangkaian *notch filter* dapat memberikan penguatan sebesar 0,03x pada saat tegangan masukan memiliki frekuensi 50Hz dan melewati tegangan masuk selain frekuensi tersebut alias *notch filter* sesuai perencanaan.



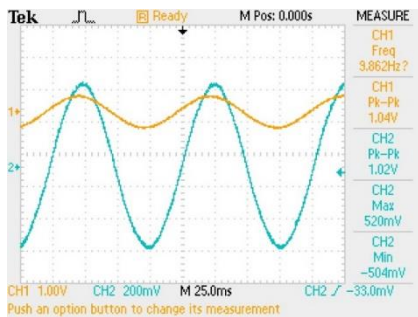
Gambar 4.16 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian *notch filter*.



Gambar 4.17 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada *notch filter*.

Tabel 4.10 Pengujian rangkaian *notch filter*.

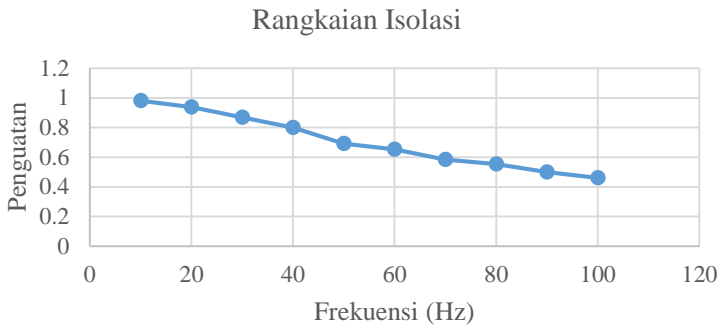
| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mVpp AC) | V _{out} (mVpp AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| 10 | 984 | 920 | 0,94 |
| 20 | 984 | 792 | 0,81 |
| 30 | 976 | 560 | 0,57 |
| 40 | 984 | 280 | 0,29 |
| 50 | 976 | 24 | 0,03 |
| 60 | 976 | 224 | 0,23 |
| 70 | 968 | 400 | 0,41 |
| 80 | 984 | 520 | 0,53 |
| 90 | 968 | 608 | 0,63 |
| 100 | 968 | 664 | 0,69 |



Gambar 4.18 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian isolasi.

4.1.11. Pengujian Rangkaian Isolasi

Pengujian rangkaian isolasi dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 1.040mVpp AC terhadap terminal masukan dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Gambar 4.18 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Gambar 4.19 menunjukkan grafik relasi antara frekuensi dan penguatan pada isolasi. Tabel 4.11 merujuk pada pengamatan penguatan yang diberikan oleh rangkaian isolasi. Terlihat bahwa rangkaian isolasi mulai mengalami penguatan lebih dari 0,7x pada frekuensi di atas 50Hz dan dapat melewati frekuensi di bawahnya. Rangkaian isolasi dapat melewati sinyal di bawah frekuensi 20Hz dengan penguatan minimum sebesar 0,94x.



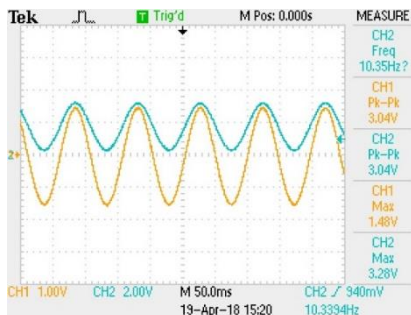
Gambar 4.19 Relasi antara frekuensi dan penguatan pada isolasi.

Tabel 4.11 Pengujian rangkaian isolasi.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mV _{pp} AC) | V _{out} (mV _{pp} AC) | Penguatan |
|----------------|---------------------------------------|--|-----------|
| 10 | 1.040 | 1020 | 0,98 |
| 20 | 1.040 | 976 | 0,94 |
| 30 | 1.040 | 904 | 0,87 |
| 40 | 1.040 | 832 | 0,80 |
| 50 | 1.040 | 720 | 0,69 |
| 60 | 1.040 | 680 | 0,65 |
| 70 | 1.040 | 608 | 0,59 |
| 80 | 1.040 | 576 | 0,56 |
| 90 | 1.040 | 520 | 0,50 |
| 100 | 1.040 | 480 | 0,46 |

4.1.12. Pengujian Rangkaian *Adder*

Pengujian rangkaian *adder* dilakukan sebanyak dua kali. Pertama, dilakukan pengujian untuk kondisi penambahan minimum dengan tegangan masukan sebesar 1.200mV_{max} AC dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan memvariasikan frekuensi tegangan masukan mulai dari 10Hz hingga 100Hz. Kedua, dilakukan pengujian untuk kondisi penambahan maksimum dengan tegangan masukan sebesar 1.480mV_{max} AC dan dilakukan pengamatan tegangan pada terminal keluaran dengan variasi frekuensi yang sama. Gambar 4.20 menunjukkan citra osiloskop saat melakukan pengujian. Ta-



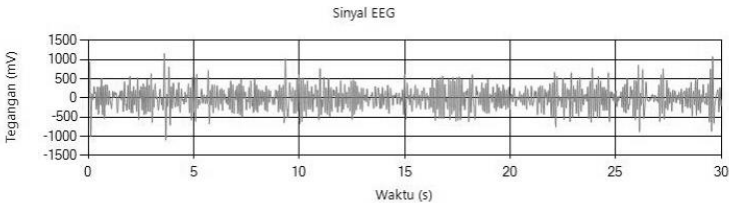
Gambar 4.20 Citra osiloskop saat pengujian rangkaian *adder*.

Tabel 4.12 Pengujian rangkaian *adder*.

| Frekuensi (Hz) | V _{in} (mVmax AC) | V _{out} (mVmax AC) | Selisih |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|
| Penambahan Minimum | | | |
| 10 | 1.200 | 1.200 | 0 |
| 20 | 1.200 | 1.240 | 40 |
| 30 | 1.200 | 1.320 | 120 |
| 40 | 1.200 | 1.280 | 80 |
| 50 | 1.200 | 1.240 | 40 |
| 60 | 1.200 | 1.200 | 0 |
| 70 | 1.200 | 1.280 | 80 |
| 80 | 1.200 | 1.240 | 40 |
| 90 | 1.200 | 1.240 | 40 |
| 100 | 1.200 | 1.240 | 40 |
| Rata-rata | | | 48 |
| Penambahan Maksimum | | | |
| 10 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 20 | 1.480 | 3.200 | 1.720 |
| 30 | 1.480 | 3.200 | 1.720 |
| 40 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 50 | 1.480 | 3.200 | 1.720 |
| 60 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 70 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 80 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 90 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| 100 | 1.480 | 3.280 | 1.800 |
| Rata-rata | | | 1.776 |

Tabel 4.13 Penentuan penguatan total.

| Blok Rangkaian | Ekspektasi | Realita |
|-----------------------|------------|-----------|
| Penguat Instrumentasi | 13,5 | 17,53 |
| Penguat Tak Membalik | 51 | 46,92 |
| Penguat Variabel | 30 | 19,40 |
| Total | 20.655 | 30.375,62 |



Gambar 4.21 Plot sinyal hasil penggunaan penguatan total realita.

Tabel 4.14 Pengujian rangkaian suplai daya.

| Blok Suplai Daya | Polaritas | Tegangan (V) |
|------------------|-----------|--------------|
| A | + | 12,11 |
| | - | 12,09 |
| B | + | 4,72 |
| | - | 3,58 |

bel 4.12 merujuk pada pengamatan penambahan yang diberikan oleh rangkaian *adder*. Terlihat bahwa rangkaian *adder* dapat memberikan penambahan minimum dengan nilai rata-rata sebesar 48mV dan penambahan maksimum dengan nilai rata-rata sebesar 1.776mV. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian *adder* dapat berfungsi.

4.1.13. Penentuan Penguatan Total

Untuk melakukan kompensasi terhadap toleransi nilai-nilai komponen pada perangkat keras dan menyesuaikan agar sinyal subyek dapat terbaca dalam jangkauan *Analog-to-Digital Converter*, maka dilakukan pengubahan penguat variabel agar dapat memiliki nilai penguatan sesuai kebutuhan. Tabel 4.13 merujuk pada penentuan penguatan total antara ekspektasi dan realita yang digunakan. Plot sinyal menggunakan penguatan realita ditunjukkan Gambar 4.21.

4.1.14. Pengujian Rangkaian Suplai Daya

Pengujian rangkaian suplai daya terbagi menjadi dua: pengujian suplai daya A yang menyuplai blok rangkaian sebelum rangkaian isolasi dan suplai daya B yang menyuplai blok rangkaian sesudah rangkaian isolasi. Tabel 4.14 merujuk pada tegangan yang dihasilkan kedua suplai daya untuk kedua polaritas.

4.2. Pengujian Perangkat Lunak

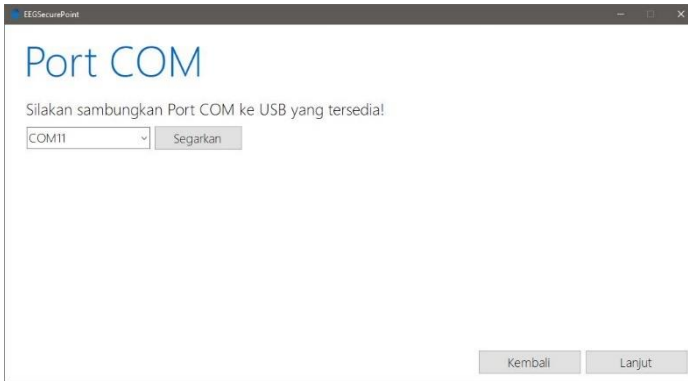
Gambar 4.22 menunjukkan tampilan awal dari hasil akhir dari perangkat lunak yang akan diuji. Diharapkan perangkat lunak dapat: (1) mengidentifikasi perangkat keras berbasis identitas Port COM via SerialPort, (2) pengujian filter digital, (3) pengujian *window*, (4) pengujian *Fast Fourier Transform*, (5) pengujian *data-binning* dan normalisasi, dan (6) pengujian manipulasi basis data.

4.2.1. Pengujian SerialPort

Gambar 4.23a menunjukkan tampilan laman Port COM ketika perangkat keras elektroensefalografi dihubungkan dengan *Personal Computer* (PC), seperti yang terlihat pada Gambar 4.23b. Gambar 4.24a menunjukkan tampilan laman Port COM ketika Samsung Galaxy A520 dihubungkan dengan PC, seperti yang terlihat pada Gambar 4.24b. Terlihat bahwa laman Port COM dapat bekerja dengan baik dalam mengidentifikasi perangkat keras yang akan digunakan.



Gambar 4.22 Tampilan awal perangkat lunak.



(a)



(b)

Gambar 4.23 (a) Tampilan laman Port COM saat perangkat keras elektroensefalografi dihubungkan dengan PC, (b) Pengujian perangkat keras elektroensefalografi dihubungkan dengan PC.

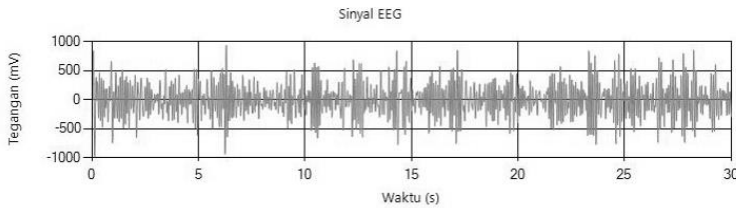


(a)

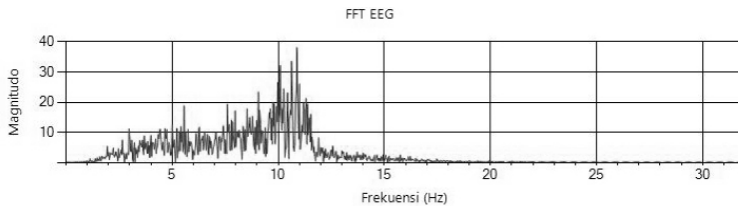


(b)

Gambar 4.24 (a) Tampilan laman Port COM saat Samsung Galaxy A520 dihubungkan dengan PC, (b) Pengujian Samsung Galaxy A520 dihubungkan dengan PC.



Gambar 4.25 Sinyal EEG yang telah difilter digital.



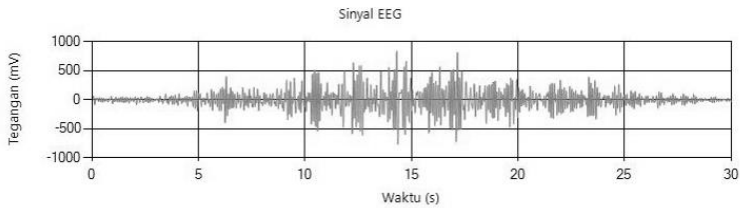
Gambar 4.26 Spektrum sinyal EEG yang telah difilter secara digital.

4.2.2. Pengujian Filter Digital

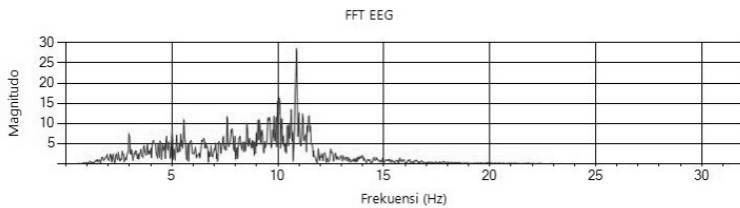
Pengujian filter digital dilakukan dengan melakukan eksperimen bersama subyek yang telah mengenakan sensor elektroensefalografi (EEG) yang terhubung dengan perangkat keras. Gambar 4.25 menunjukkan sinyal EEG yang telah difilter secara digital. Untuk mengetahui apakah spektrum frekuensi tersebut masih berada dalam jangkauan 4-14Hz, maka dilakukan analisis spektrum frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Gambar 4.26 menunjukkan hasil spektrum frekuensi dari sinyal yang telah difilter secara digital. Terlihat bahwa sinyal selain *pass-band* telah teredam. Hal ini menunjukkan bahwa filter digital dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

4.2.3. Pengujian *Window*

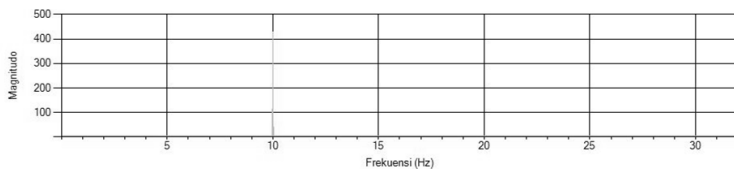
Sinyal yang sebelumnya telah difilter secara digital akan difilter ulang menggunakan *window* Hamming. Gambar 4.27 menunjukkan sinyal EEG yang telah diberi *window*. Gambar 4.28 menunjukkan hasil spektrum frekuensi dari sinyal yang telah diberi *window*. Secara visual, terlihat bahwa *leakage* yang ada pada FFT pada Gambar 4.28 berkurang dibandingkan dengan Gambar 4.26.



Gambar 4.27 Sinyal EEG yang telah diberi *window*.



Gambar 4.28 Spektrum sinyal EEG yang telah diberi *window*.



Gambar 4.29 Spektrum sinyal uji.

4.2.4. Pengujian *Fast Fourier Transform*

Dalam melakukan pengujian *Fast Fourier Transform* (FFT), akan diberikan sinyal uji 4Vpp AC dengan frekuensi 10Hz pada *Analog-to-Digital Converter*. Kemudian, dilakukan pengamatan pada perangkat lunak terhadap spektrum frekuensi yang ditampilkan. Gambar 4.29 menunjukkan hasil spektrum frekuensi untuk sinyal uji. Terlihat bahwa hasil FFT menunjukkan hanya ada satu frekuensi yang muncul pada grafik, yaitu frekuensi 10Hz. Hal ini membuktikan bahwa algoritma Accord.Math bekerja dengan baik.

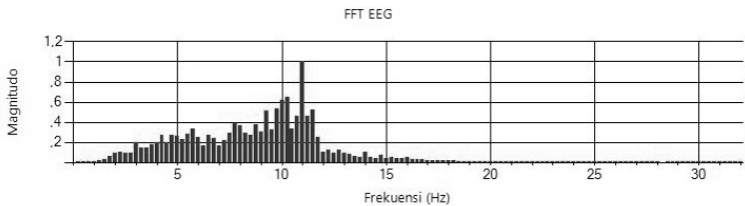
4.2.5. Pengujian *Data-binning* dan Normalisasi

Spektrum sinyal Gambar 4.30 diolah menggunakan *data-binning* sekaligus dengan normalisasi. Pada pengujian ini, akan digunakan 128 bin

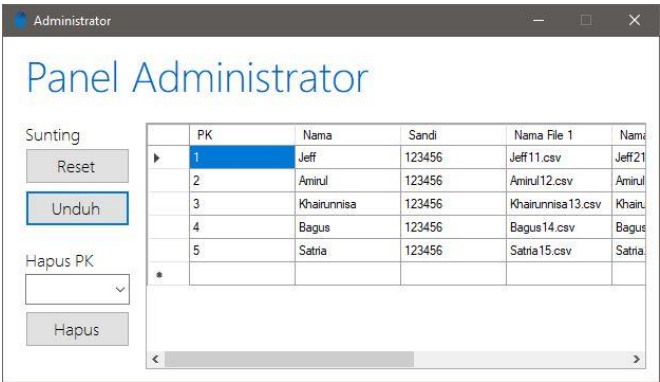
dengan masing-masing bin mewakili lebar pita sebesar 0,5Hz sebagai sarana *data-binning*. Gambar 4.30 menunjukkan hasil spektrum frekuensi yang telah dikelompokkan menggunakan teknik rata-rata. Hal ini membuktikan bahwa algoritma untuk *data-binning* dan normalisasi dapat bekerja dengan baik.

4.2.6. Pengujian Basis Data

Pengujian basis data dilakukan dengan melakukan sekuens registrasi dan melihat pada laman Panel Administrator perihal apakah data registrasi telah masuk ke dalam basis data. Dalam pengujian ini, akan dilakukan registrasi terhadap lima subyek dengan nama: Jeff, Amirul, Khairunnisa, Bagus, dan Satria dengan kata sandi, yaitu ‘123456’. Setelah melakukan sekuens registrasi, laman Panel Administrator akan diperiksa untuk mengetahui adanya perubahan basis data. Gambar 4.31 menunjukkan laman Panel Administrator sesudah dilakukan sekuens registrasi. Terlihat bahwa sistem basis data berjalan dengan baik.



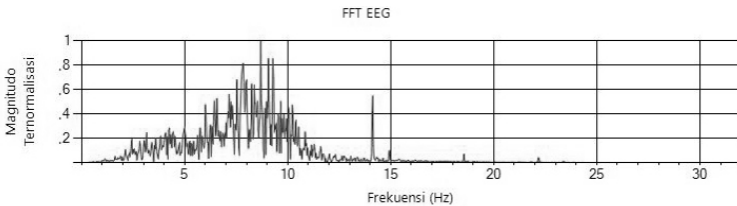
Gambar 4.30 Spektrum frekuensi yang dikelompokkan ke dalam bin.



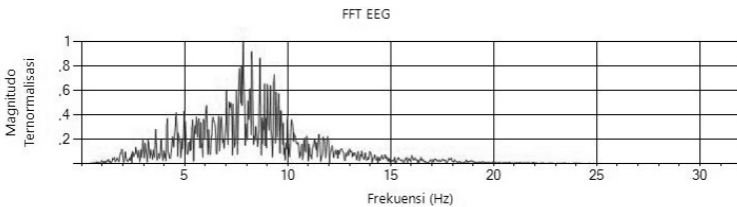
Gambar 4.31 Laman Panel Administrator sesudah sekuens registrasi.

4.3. Analisis Konfigurasi Pemasangan Elektroda

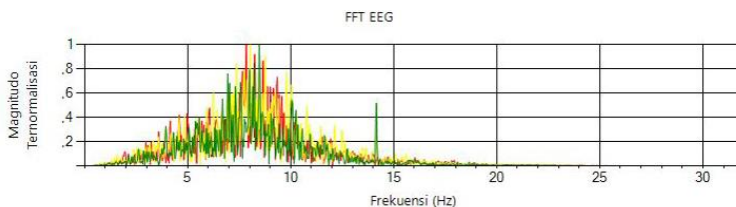
Pada studi ini, akan diuji dua konfigurasi elektroda: elektroda jenis Ag/AgCl *reusable* dengan konfigurasi Oz untuk sinyal masukan, A1 untuk referensi, dan Fpz untuk *common-mode* dan elektroda jenis Ag/AgCl *disposable* dengan konfigurasi Fp2 untuk sinyal masukan, A2 untuk referensi, dan A1 untuk *common-mode*. Gambar 4.32 menunjukkan hasil spektrum frekuensi menggunakan elektroda Ag/AgCl *reusable* dan Gambar 4.33 untuk elektroda Ag/AgCl *disposable*. Dengan korelasi silang sebesar 0,72, terlihat bahwa kedua jenis elektroda dan konfigurasi yang berbeda dapat menghasilkan spektrum frekuensi yang serupa. Namun, dengan mempertimbangkan kemudahan instalasi, konfigurasi menggunakan elektroda Ag/AgCl *disposable* akan digunakan dalam eksperimen selanjutnya.



Gambar 4.32 Spektrum frekuensi sinyal dengan elektroda Ag/AgCl *reusable*.



Gambar 4.33 Spektrum frekuensi sinyal dengan elektroda Ag/AgCl *disposable*.



Gambar 4.34 Spektrum frekuensi untuk akuisisi beda waktu.

Tabel 4.15 Nilai korelasi silang untuk akuisisi beda waktu.

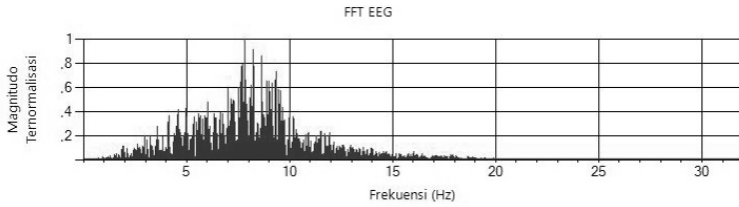
| Korelasi Silang | Hari ke-1 | Hari ke-4 | Hari ke-6 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Hari ke-1 | | 0,70 | 0,65 |
| Hari ke-4 | | | 0,73 |
| Hari ke-6 | | | |
| Rata-rata | | | 0,69 |

4.4. Analisis Properti Sinyal Alfa

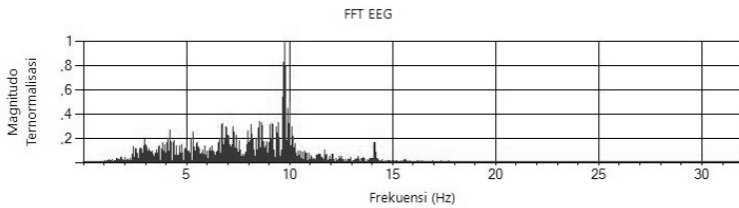
Sebagai sebuah fitur biometrik, harus dipastikan bahwa sinyal elektroensefalografi (EEG) dari subyek adalah permanen. Oleh karena itu, dilakukan pengujian dengan 1.024 bin pada subyek A untuk waktu yang berbeda.

Gambar 4.34 menunjukkan spektrum frekuensi sinyal EEG untuk akuisisi beda waktu. Sinyal warna merah merupakan sinyal akuisisi saat hari ke-1, sinyal warna kuning saat hari ke-4, dan sinyal warna hijau saat hari ke-6. Korelasi silang telah dilakukan antar-data, seperti yang terlihat pada Tabel 4.15. Terlihat bahwa nilai rata-rata korelasi untuk akuisisi beda waktu cenderung identik. Berdasarkan pengujian ini, dapat diketahui bahwa spektrum frekuensi sinyal EEG adalah permanen.

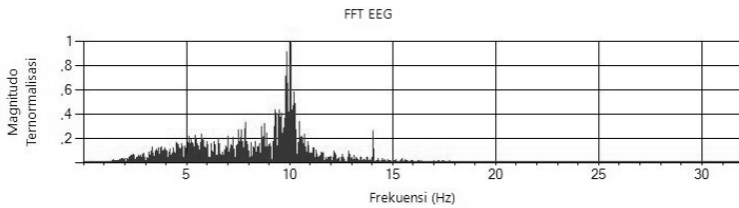
Selain memiliki sifat permanen, sinyal EEG juga harus memiliki nilai korelasi silang yang identik untuk subyek yang sama (intra-kelas). Untuk melakukan pengujian, dilakukan eksperimen dengan lima data akuisisi yang masing-masing diambil selama 30 detik terhadap lima subyek. Gambar 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, dan 4.39 merupakan salah satu sampel dari lima data untuk subyek A, B, C, D, dan E secara berurutan. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan 1.024 bin, 128 bin, dan 64 bin. Populasi data dapat dilihat pada Lampiran A.



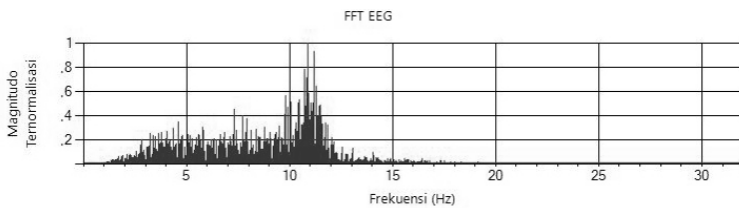
Gambar 4.35 Sampel sinyal EEG subyek A.



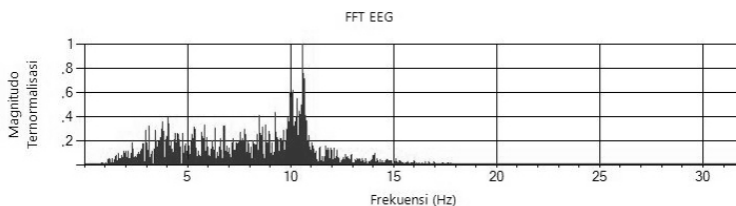
Gambar 4.36 Sampel sinyal EEG subyek B.



Gambar 4.37 Sampel sinyal EEG subyek C.



Gambar 4.38 Sampel sinyal EEG subyek D.



Gambar 4.39 Sampel sinyal EEG subyek E.

Tabel 4.16 Rata-rata korelasi silang intra-kelas untuk lima subyek.

| Subyek | Rata-rata Korelasi Silang | | |
|------------------|---------------------------|---------|--------|
| | 1.024 bin | 128 bin | 64 bin |
| A | 0,70 | 0,91 | 0,95 |
| B | 0,69 | 0,90 | 0,94 |
| C | 0,69 | 0,88 | 0,92 |
| D | 0,70 | 0,90 | 0,95 |
| E | 0,70 | 0,91 | 0,96 |
| Rata-rata | 0,70 | 0,90 | 0,94 |

Tabel 4.17 Rata-rata korelasi silang inter-kelas untuk lima subyek.

| Jumlah Bin | Rata-rata Korelasi Silang |
|------------|---------------------------|
| 1.024 bin | 0,56 |
| 128 bin | 0,72 |
| 64 bin | 0,77 |

Tabel 4.16 merujuk pada nilai rata-rata korelasi silang intra-kelas untuk lima subyek. Populasi untuk data ini dapat dilihat pada Lampiran B. Terlihat bahwa nilai korelasi silang untuk subyek yang sama cenderung mendekati identik dengan nilai 0,70 untuk 1.024 bin, 0,90 untuk 128 bin, dan 0,94 untuk 64 bin. Selain itu, diketahui bahwa semakin kecil ukuran bin, maka korelasi silang untuk subyek yang sama semakin membesar, yaitu pada 64 bin yang bernilai 0,94.

Kemudian, dilakukan studi terhadap properti sinyal EEG yang harus memiliki nilai korelasi silang yang tidak identik untuk subyek yang berbeda (inter-kelas). Menggunakan data yang sama, Tabel 4.17 merujuk pada nilai rata-rata korelasi silang inter-kelas untuk lima subyek. Populasi untuk data ini dapat dilihat pada Lampiran C. Terlihat bahwa nilai korelasi silang untuk subyek yang berbeda cenderung berada di bawah korelasi silang untuk subyek yang sama dengan nilai 0,56 untuk 1.024 bin, 0,72

untuk 128 bin, dan 0,77 untuk 64 bin. Selain itu, diketahui bahwa semakin kecil ukuran bin, maka korelasi silang untuk subyek yang berbeda semakin membesar, yaitu pada 64 bin dengan nilai 0,77.

4.5. Analisis Pembelajaran Mesin

Terdapat dua jenis pembelajaran mesin yang diusulkan untuk dapat digunakan dalam sistem autentikasi biometrik ini, yaitu Mesin Vektor Pendukung dan Jaringan Syaraf Tiruan. Agar dapat diketahui pembelajaran mesin yang optimum, terlebih dahulu dilakukan akuisisi sinyal elektroensefalografi terhadap lima subyek. Akuisisi dilakukan sebanyak sepuluh kali secara berurutan: lima data untuk data latih (berasal dari eksperimen sebelumnya) dan lima data untuk data uji yang dapat dilihat pada Lampiran D. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan 1.024 bin, 128 bin, dan 64 bin.

Tabel 4.18 Analisis persentase verifikasi untuk 1.024 bin.

| Pembelajaran Mesin | Jumlah Neuron | Iterasi | Waktu Eksekusi | Eror | Persentase Verifikasi | |
|------------------------|---------------|-----------|--------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| | | | | | Data yang Sama | Data yang Beda |
| Mesin Vektor Pendukung | | | 24 detik | | 84% | 44% |
| Jaringan Syaraf Tiruan | 10 | 10.000 | 38 detik | 3×10^{-4} | 100% | 92% |
| | | 100.000 | 4 menit 24 detik | 9×10^{-5} | 100% | 84% |
| | | 1.000.000 | 1 jam 17 menit 13 detik | 4×10^{-5} | 100% | 96% |
| | 100 | 10.000 | 2 menit 4 detik | 4×10^{-4} | 100% | 80% |
| | | 100.000 | 13 menit 50 detik | 1×10^{-4} | 100% | 88% |
| | | 1.000.000 | 3 jam 10 menit 45 detik | 2×10^{-4} | 100% | 72% |
| | 1.000 | 10.000 | 27 menit 57 detik | 5×10^{-4} | 100% | 80% |
| | | 100.000 | 3 jam 30 menit 55 detik | 5×10^{-4} | 100% | 92% |
| | | 1.000.000 | 23 jam 41 menit 13 detik | 3×10^{-3} | 100% | 48% |

Tabel 4.19 Analisis persentase verifikasi untuk 128 bin.

| Pembelajaran Mesin | Jumlah Neuron | Iterasi | Waktu Eksekusi | Eror | Persentase Verifikasi | |
|------------------------|---------------|-----------|-------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| | | | | | Data yang Sama | Data yang Beda |
| Mesin Vektor Pendukung | | | 1 detik | | 76% | 52% |
| Jaringan Syaraf Tiruan | 10 | 10.000 | 50 detik | 2×10^{-4} | 100% | 88% |
| | | 100.000 | 11 menit 13 detik | 6×10^{-5} | 100% | 92% |
| | | 1.000.000 | 48 menit 19 detik | 4×10^{-5} | 100% | 96% |
| | 100 | 10.000 | 1 menit 4 detik | 4×10^{-4} | 100% | 84% |
| | | 100.000 | 18 menit 34 detik | 1×10^{-4} | 100% | 88% |
| | | 1.000.000 | 1 jam 5 menit 10 detik | 5×10^{-5} | 100% | 96% |
| | 1.000 | 10.000 | 5 menit 22 detik | 1×10^{-3} | 100% | 88% |
| | | 100.000 | 51 menit 52 detik | 8×10^{-4} | 100% | 80% |
| | | 1.000.000 | 3 jam 41 menit 25 detik | 3×10^{-4} | 100% | 56% |

Tabel 4.20 Analisis persentase verifikasi untuk 64 bin.

| Pembelajaran Mesin | Jumlah Neuron | Iterasi | Waktu Eksekusi | Eror | Persentase Verifikasi | |
|------------------------|---------------|-----------|-------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| | | | | | Data yang Sama | Data yang Beda |
| Mesin Vektor Pendukung | | | 1 detik | | 60% | 64% |
| Jaringan Syaraf Tiruan | 10 | 10.000 | 1 menit 23 detik | 2×10^{-4} | 100% | 84% |
| | | 100.000 | 11 menit 39 detik | 1×10^{-4} | 100% | 96% |
| | | 1.000.000 | 1 jam 6 menit 17 detik | 5×10^{-5} | 100% | 96% |
| | 100 | 10.000 | 1 menit 50detik | 1×10^{-3} | 100% | 92% |
| | | 100.000 | 15 menit 11 detik | 1×10^{-3} | 100% | 92% |
| | | 1.000.000 | 1 jam 14 menit 40 detik | 2×10^{-4} | 100% | 88% |
| | 1.000 | 10.000 | 3 menit 51 detik | 4×10^{-4} | 100% | 76% |
| | | 100.000 | 24 menit 40 detik | 1×10^{-3} | 100% | 76% |
| | | 1.000.000 | 3 jam 9 menit 10 detik | 5×10^{-4} | 100% | 84% |

Dari Tabel 4.18, 4.19, dan 4.20, dapat diketahui bahwa persentase verifikasi tertinggi untuk 1.024 dan 128 bin dengan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan atau *Artificial Neural Network* (ANN) 10 neuron dan iterasi 1.000.000 adalah 96%. Persentase serupa juga dimiliki oleh ANN dengan 10 neuron pada iterasi 100.000 dan 1.000.000. Dari Tabel 4.19 diketahui bahwa ANN dengan 10 neuron, iterasi 1.000.000, dan masukan 128 bin memiliki waktu eksekusi yang lebih cepat dibandingkan

dengan kedua ANN dengan jumlah neuron dan iterasi yang sama. Selain itu, eror yang dimiliki oleh ANN 10 neuron, iterasi 1.000.000, dan masukan 128 bin ini juga memiliki eror sebesar 3×10^{-5} yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan ANN lainnya.

4.6. Implementasi Program Antar-muka dengan Pembelajaran Mesin Terpilih

Dengan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan atau *Artificial Neural Network* (ANN) dengan 10 neuron, iterasi 1.000.000, dan masukan 128 bin yang memiliki persentase verifikasi sebesar 96%, maka program antar-muka diprogram ulang agar dapat berjalan pada pembelajaran mesin yang terpilih. Tabel 4.21 merujuk pada perbandingan antara identitas subyek realita dan identitas subyek hasil identifikasi menggunakan integrasi antara program antar-muka dan pembelajaran mesin terpilih secara *real-time*. Terlihat bahwa dalam program antar-muka *real-time* ini, persentase verifikasinya adalah 80% pada tiga subyek. Populasi data citra program dapat dilihat pada Lampiran E.

Tabel 4.21 Pengujian program antar-muka dengan pembelajaran mesin terpilih.

| Subyek Realita | Subyek Hasil Identifikasi | Cocok (Ya/Tidak) |
|-----------------------|---------------------------|------------------|
| A | A | Ya |
| A | A | Ya |
| A | A | Ya |
| A | A | Ya |
| A | A | Ya |
| B | B | Ya |
| B | C | Tidak |
| B | B | Ya |
| B | C | Tidak |
| B | C | Tidak |
| C | C | Ya |
| C | C | Ya |
| C | C | Ya |
| C | C | Ya |
| C | C | Ya |
| Persentase Verifikasi | | 80% |

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada pelaksanaan tugas akhir ini didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sinyal elektroensefalografi (EEG) dapat diakuisisi dengan perangkat keras instrumentasi satu *lead* berbasis Arduino Nano dengan penguatan sebesar 3×10^4 .
2. Elektroda Ag/AgCl *disposable* dapat digunakan untuk akuisisi sinyal EEG dengan konfigurasi pemasangan elektroda berupa Fp2 untuk sinyal masukan, A2 untuk referensi, dan A1 untuk *common-mode*.
3. Metode agar sinyal EEG dapat menjadi fitur autentikasi dengan persentase verifikasi sebesar 96% adalah dengan melakukan filter digital Butterworth orde 3 lebar pita 4-14Hz, *window* Hamming, *Fast Fourier Transform* berbasis Accord.Math, 128 bin, normalisasi, dan dikenali menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan dengan 10 neuron dan iterasi 1.000.000.
4. Program antar-muka yang telah mengimplementasikan metode pengolahan sinyal EEG terpilih dengan lingkungan .NET memiliki persentase verifikasi sebesar 80%.

5.2. Saran

Dalam pengembangan fitur autentikasi biometrik berbasis sinyal elektroensefalografi ini, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan.

1. Sistem autentikasi harus dapat membedakan subyek yang telah ter-register dan tidak berdasarkan sinyal elektroensefalografi.
2. Selama pengambilan data, proses akuisisi sebaiknya dilakukan pada ruangan gelap, bebas derau suara, dan rendah derau kelistrikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Nakanishi, S. Baba, dan C. Miyamoto, "EEG based biometric authentication using new spectral features," 2009, hlm. 651–654.
- [2] C. Miyamoto, S. Baba, dan I. Nakanishi, "Biometric person authentication using new spectral features of electroencephalogram (EEG)," 2009, hlm. 1–4.
- [3] A. K. Jain, P. Flynn, dan A. A. Ross, Ed., *Handbook of biometrics*. New York, NY: Springer, 2008.
- [4] C. Yudianto, M. Rivai, dan Tasripan, "Sistem Pengamanan Gudang Senjata menggunakan RFID dan Sidik Jari," *J. Tek. ITS*, vol. 7, 2018.
- [5] A. K. Jain, Ed., *Biometrics: personal identification in networked society*, 1. softcover print. New York, NY: Springer, 2006.
- [6] A. K. Jain, A. Ross, dan S. Prabhakar, "An Introduction to Biometric Recognition," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 14, no. 1, hlm. 4–20, Jan 2004.
- [7] L. O’Gorman, "Comparing passwords, tokens, and biometrics for user authentication," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 12, hlm. 2021–2040, Des 2003.
- [8] S. Prabhakar, S. Pankanti, dan A. K. Jain, "Biometric recognition: security and privacy concerns," *IEEE Secur. Priv. Mag.*, vol. 1, no. 2, hlm. 33–42, Mar 2003.
- [9] T. Matsumoto, H. Matsumoto, K. Yamada, dan S. Hishino, "Impact of Artificial ‘Gummy’ Fingers on Fingerprint Systems," *Proc SPIE*, vol. 4677, hlm. 275–289, Jan 2002.
- [10] S. Sanei dan J. Chambers, *EEG signal processing*. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [11] M. J. A. M. van Putten, *Essentials of neurophysiology: basic concepts and clinical applications for scientists and engineers*. Berlin: Springer, 2009.
- [12] M. Teplan, "Fundamentals of EEG Measurements," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 2, 2002.
- [13] R. Palaniappan dan D. P. Mandic, "Biometrics from Brain Electrical Activity: A Machine Learning Approach," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 29, no. 4, hlm. 738–742, Apr 2007.
- [14] C. E. Tenke dkk., "Current Source Density Measures of Electroencephalographic Alpha Predict Antidepressant Treatment Response," *Biol. Psychiatry*, vol. 70, no. 4, hlm. 388–394, Agu 2011.
- [15] Charles Kitchin dan Lew Counts, *A Designer’s Guide to*

Instrumentation Amplifier 3rd Edition. 2007.

- [16] D. L. Schomer dan F. H. Lopes da Silva, Ed., *Niedermeyer's electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*, Seventh edition. New York, NY: Oxford University Press, 2018.
- [17] A. Webb, *Principles of biomedical instrumentation*. Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2018.
- [18] L. Zhang, X. Guo, X. Wu, dan B. Zhou, "Low-cost circuit design of EEG signal acquisition for the brain-computer interface system," 2013, hlm. 245–250.
- [19] Fathan Nur Hakim, Achmad Arifin, dan Tasripan, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Navigasi Kursi Roda Listrik menggunakan Sinyal EEG," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [20] A. Nait-Ali, Ed., *Advanced biosignal processing*. Berlin: Springer, 2009.
- [21] Thomas Kugelstadt, "Getting the most out of your instrumentation amplifier design," *Analog Appl. J.*, 4Q 2005.
- [22] S. A. Paktitis, *Active filters: theory and design*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [23] R. Mancini dan B. Carter, Ed., *Op amps for everyone*, 3rd ed. Amsterdam ; Boston : Elsevier, Newnes, 2009.
- [24] Rajesh Singh, Anita Gehlot, Bhupendra Singh, dan S. Choudhury, *Arduino-Based Embedded Systems Interfacing, Simulation, and Labview GUI*. CRC Press, 2018.
- [25] S. V. Kulkarni dan S. A. Khaparde, *Transformer engineering: design and practice*. New York, NY: Dekker, 2004.
- [26] W. H. Kersting, *Distribution system modeling and analysis, Third Edition*. Abingdon; Abingdon: CRC Press Taylor & Francis Group [distributor, 2012.
- [27] Erwin Widjaja, Achmad Arifin, Fauzan Arrofiqi, dan Mohammad Nuh, "Rancang Bangun Sistem Restorasi Gerak Sendi Siku dan Pergelangan Tangan menggunakan Functional Electrical Stimulation," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [28] R. J. Herrick, *DC/AC circuits and electronics: principles & applications*. Clifton Park, N.Y: Thomson/Delmar Learning, 2003.
- [29] S. Winder, *Analog and digital filter design*, 2. ed. Amsterdam: Newnes, 2002.
- [30] S. W. Smith, *Digital signal processing: a practical guide for*

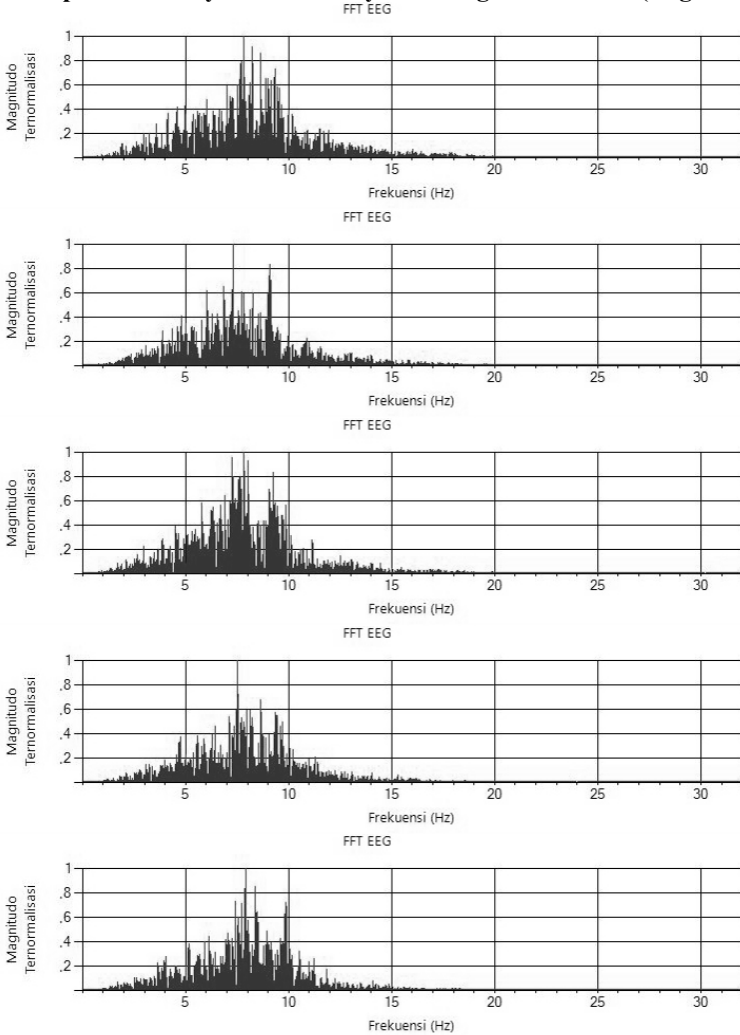
- engineers and scientists*. Amsterdam ; Boston: Newnes, 2003.
- [31] Muhammad Rivai, Tasripan, dan Sumandari, “Pengenalan Pola Sinyal Suara Kerusakan Motor Listrik menggunakan Neural Network,” *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, Okt 2007.
 - [32] M. A. Hassan dan E. A. Mahmoud, “A Comparison between Windowing FIR Filters for Extracting the EEG Components,” *J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 06, no. 04, 2015.
 - [33] J. Bell, *Machine learning: hands-on for developers and technical professionals*. Indianapolis, IN: Wiley, 2015.
 - [34] S. J. Russell, P. Norvig, dan E. Davis, *Artificial intelligence: a modern approach*, 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
 - [35] L. Wang, Ed., *Support vector machines: theory and applications*. Berlin: Springer, 2005.
 - [36] Y. Ma dan G. Guo, Ed., *Support vector machines applications*. Cham [Switzerland] ; New York: Springer, 2014.
 - [37] P. Baldi dan G. Pollastri, “A machine learning strategy for protein analysis,” *IEEE Intell. Syst.*, vol. 17, no. 2, hlm. 28–35, Mar 2002.
 - [38] S. Abe, *Support vector machines for pattern classification*, 2. ed. London: Springer, 2010.
 - [39] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, dan S. N. Deepa, *Introduction to neural networks using MATLAB 6.0*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2010.
 - [40] Helmy Widyantara, Muhammad Rivai, dan Djoko Purwanto, “Neural Network for Electronic Nose using Field Programmable Analog Arrays,” *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*, vol. 2, hlm. 739–747, Des 2012.
 - [41] F. Budiman, M. A. Nursyeha, M. Rivai, dan . S., “Pengenalan Suara Burung Menggunakan Mel Frequency Cepstrum Coefficient dan Jaringan Syaraf Tiruan pada Sistem Pengusir Hama Burung,” *J. Nas. Tek. ELEKTRO*, vol. 5, no. 1, Mar 2016.
 - [42] M. Rivai, A. Arifin, dan E. I. Agustin, “Mixed vapour identification using partition column-QCMs and Artificial Neural Network,” 2016, hlm. 172–177.
 - [43] M. Rivai, Totok M., dan Hendro J., “Kristal SiO₂ Terlapis Polimer Sebagai Sensor Uap Berdasar Pada Perubahan Frekuensi Resonansinya,” *Pros. Semin. Teknoekonomi Iptek Nukl. Serpong*, hlm. 153–164, 2006.
 - [44] B. Doyle, *C# programming: from problem analysis to program design ; [Microsoft Visual C# 2012]*, 4. ed. Boston, Mass.: Cengage

Learning, 2014.

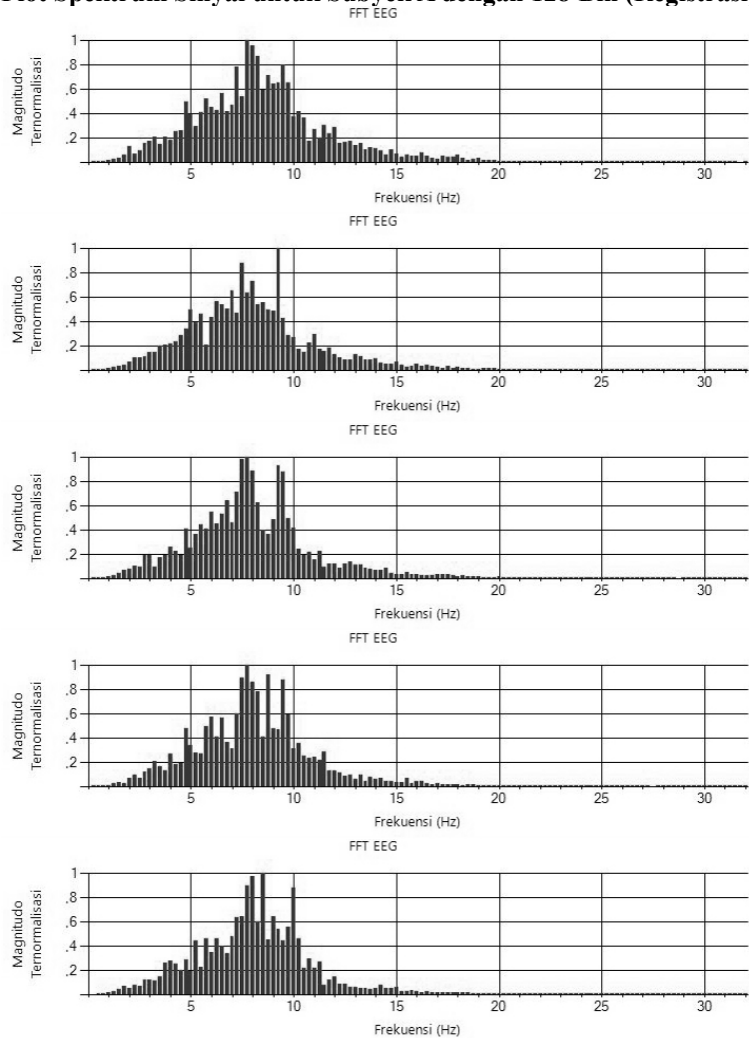
- [45] S. Mukherjee dan R. Herbrich, *F# for machine learning essentials: get up and running with machine learning with F# in a fun and functional way*. Birmingham Mumbai: Packt Publishing, 2016.
- [46] C. R. Souza, “The Accord.NET Framework.” São Carlos, Brazil, Des-2014.
- [47] A. Jones, M. MacDonald, dan R. Rajan, *Visual C# 2005 recipes: a problem-solution approach ; [succinct solutions to everyday problems]*. Berkeley, Calif: Apress, 2006.
- [48] F. Sahin dan P. Kachroo, *Practical and experimental robotics*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [49] M. J. Donahoo dan G. D. Speegle, *SQL: practical guide for developers*. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2005.
- [50] C. Fehily, *SQL (Database Programming) (2015 Edition)*. San Francisco: Questing Vole Press, 2014.
- [51] R. Chopra, *Database Management Systems (DBMS) A Practical Approach*, Fifth Edition. S Chand Publishing, 2016.
- [52] T. Mitsa, *Temporal data mining*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2010.
- [53] H. Hamdan, “Mixture model clustering of binned uncertain data: the classification approach,” 2006, vol. 1, hlm. 1645–1650.

LAMPIRAN A

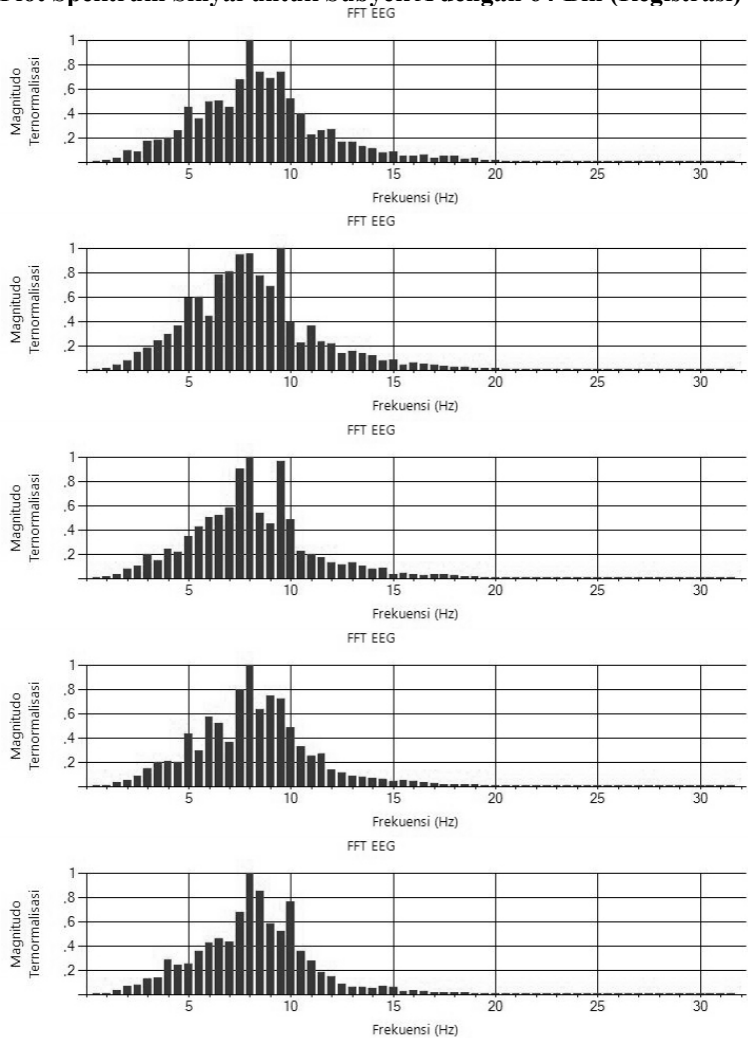
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 1.024 Bin (Registrasi)



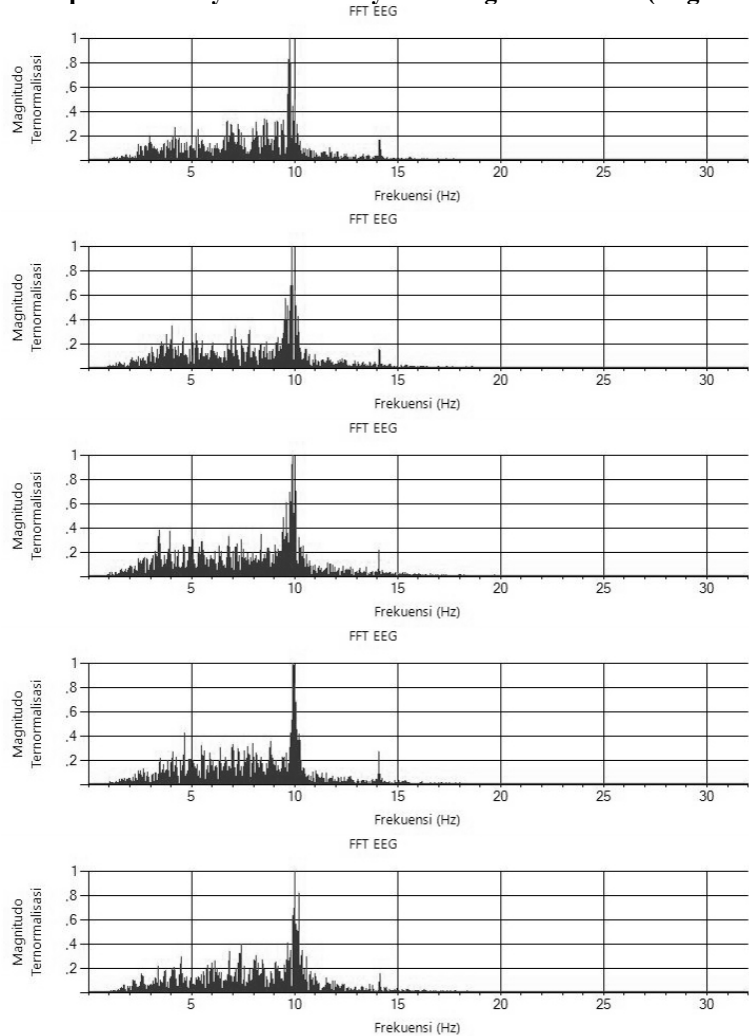
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 128 Bin (Registrasi)



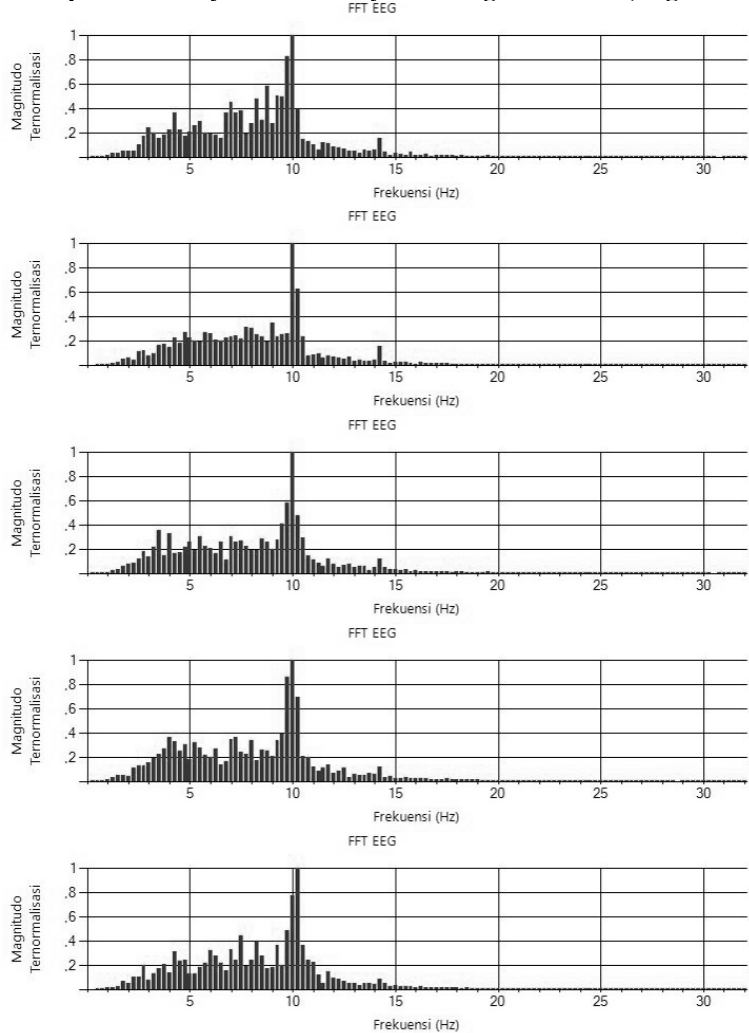
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 64 Bin (Registrasi)



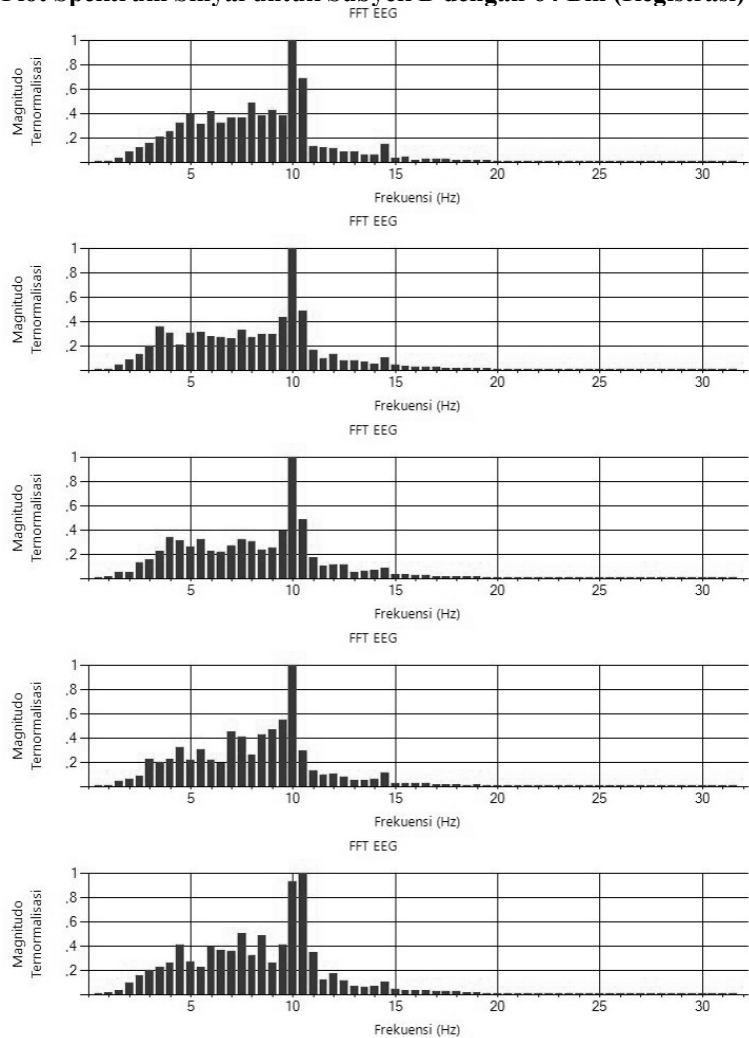
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 1.024 Bin (Registrasi)



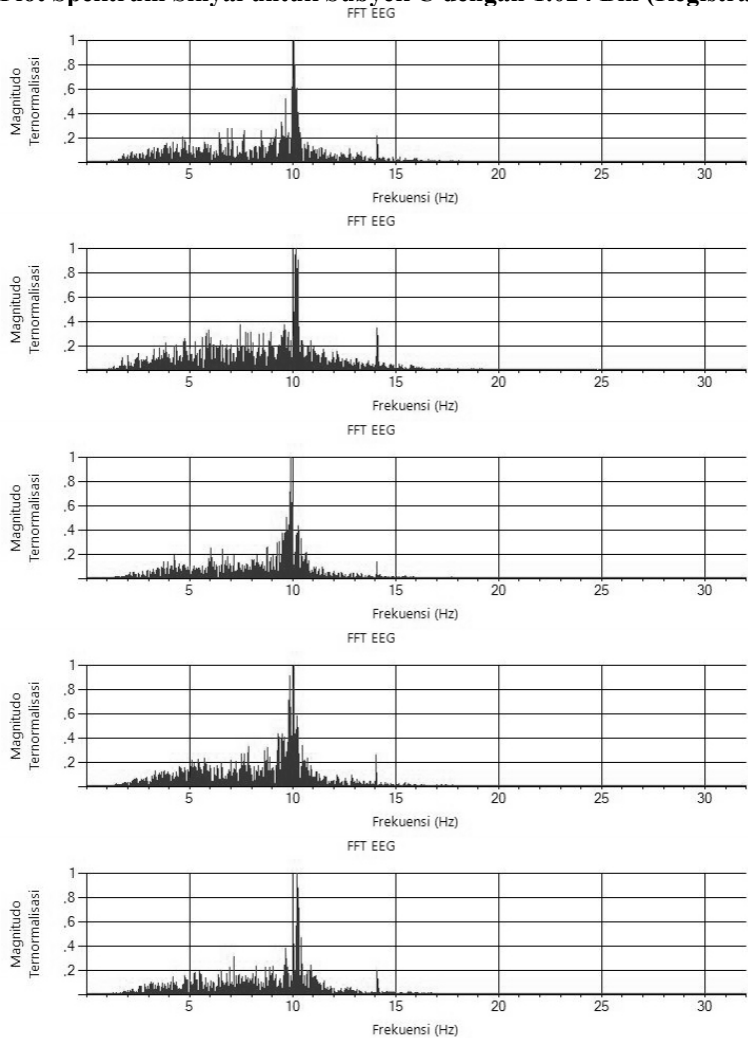
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 128 Bin (Registrasi)



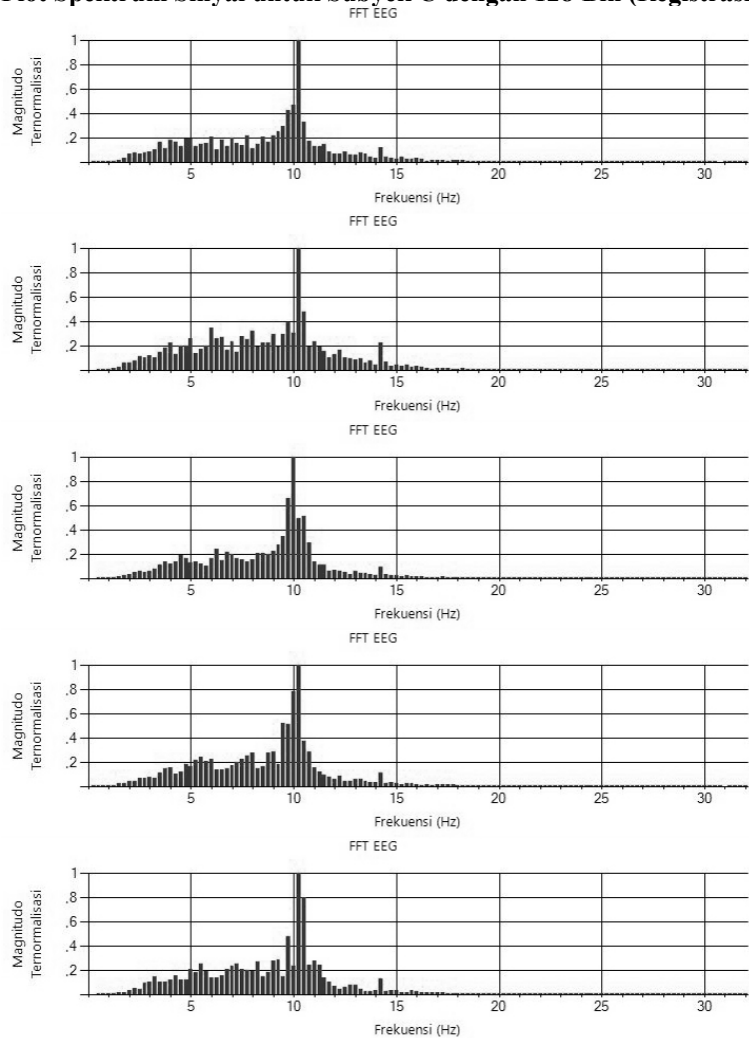
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 64 Bin (Registrasi)



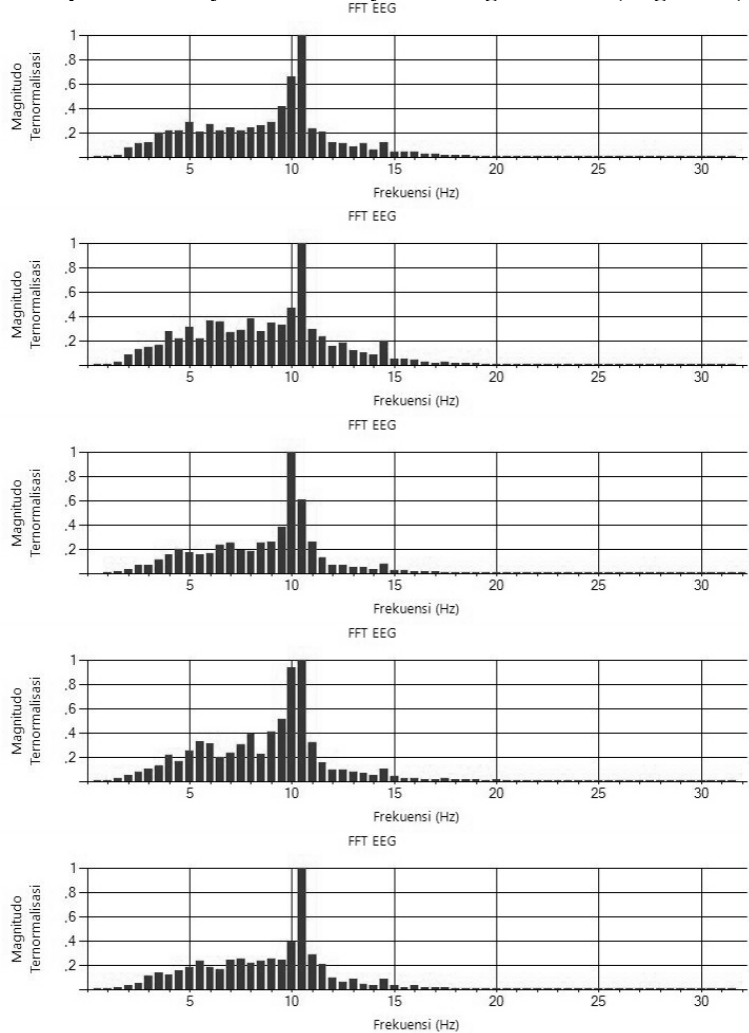
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 1.024 Bin (Registrasi)



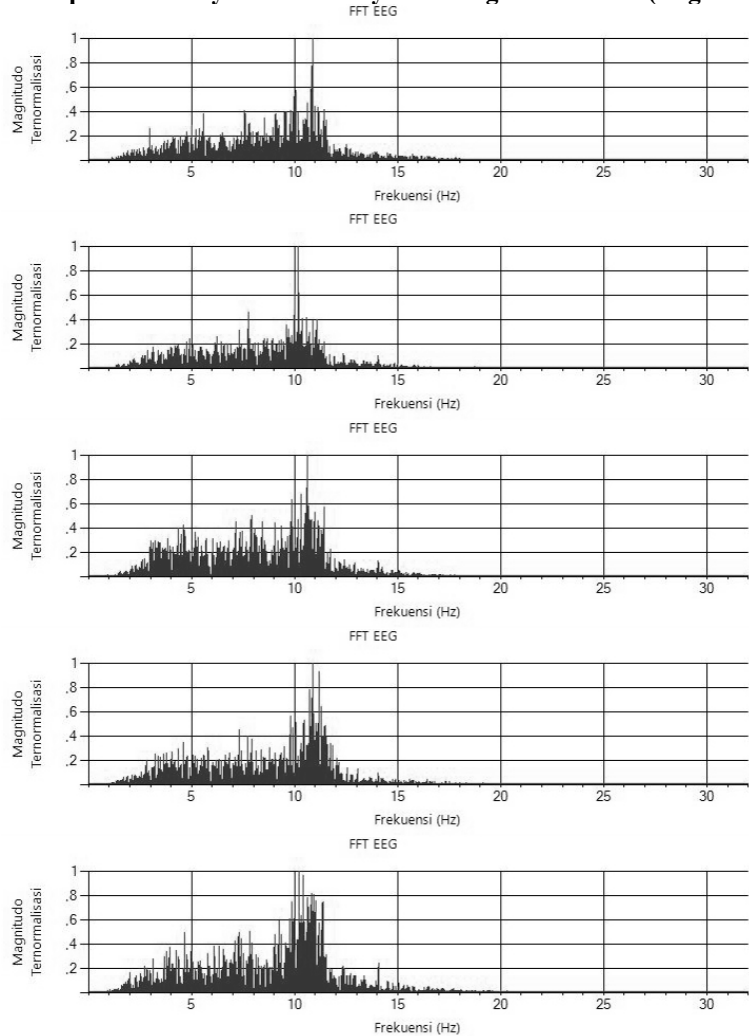
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 128 Bin (Registrasi)



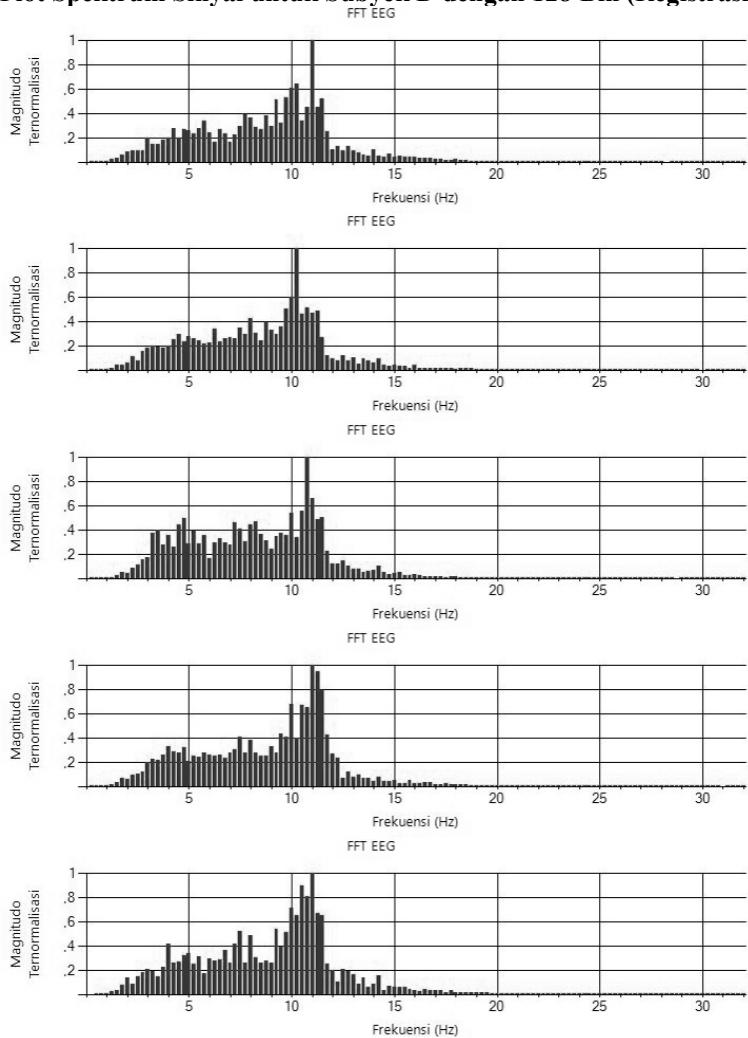
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 64 Bin (Registrasi)



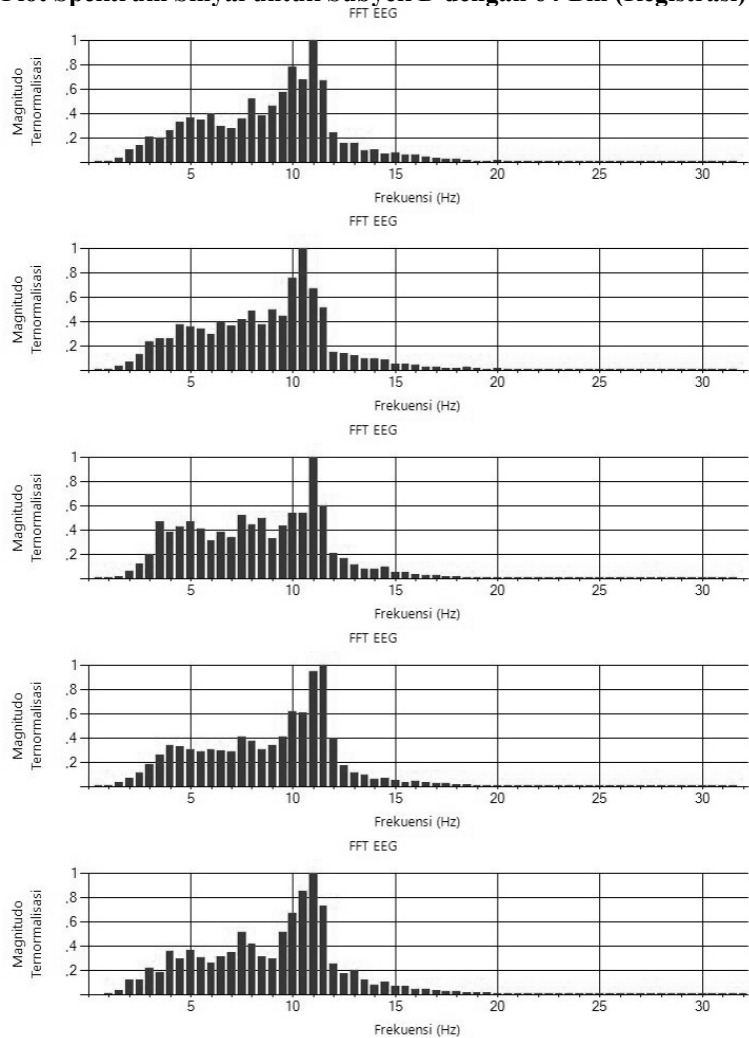
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 1.024 Bin (Registrasi)



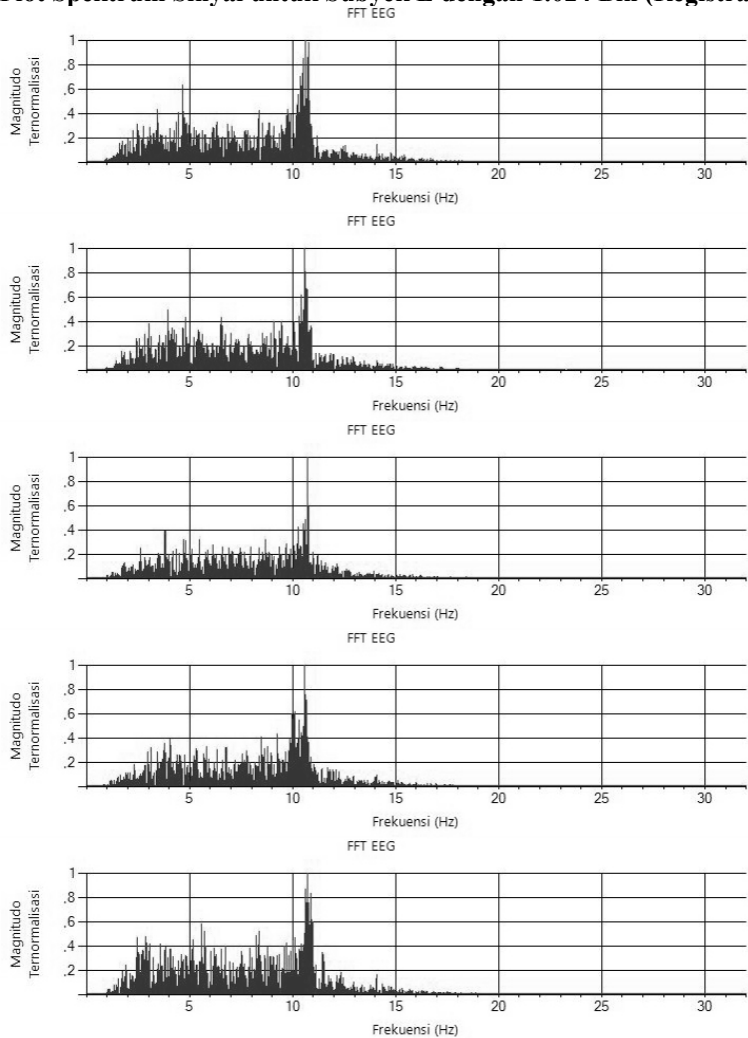
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 128 Bin (Registrasi)



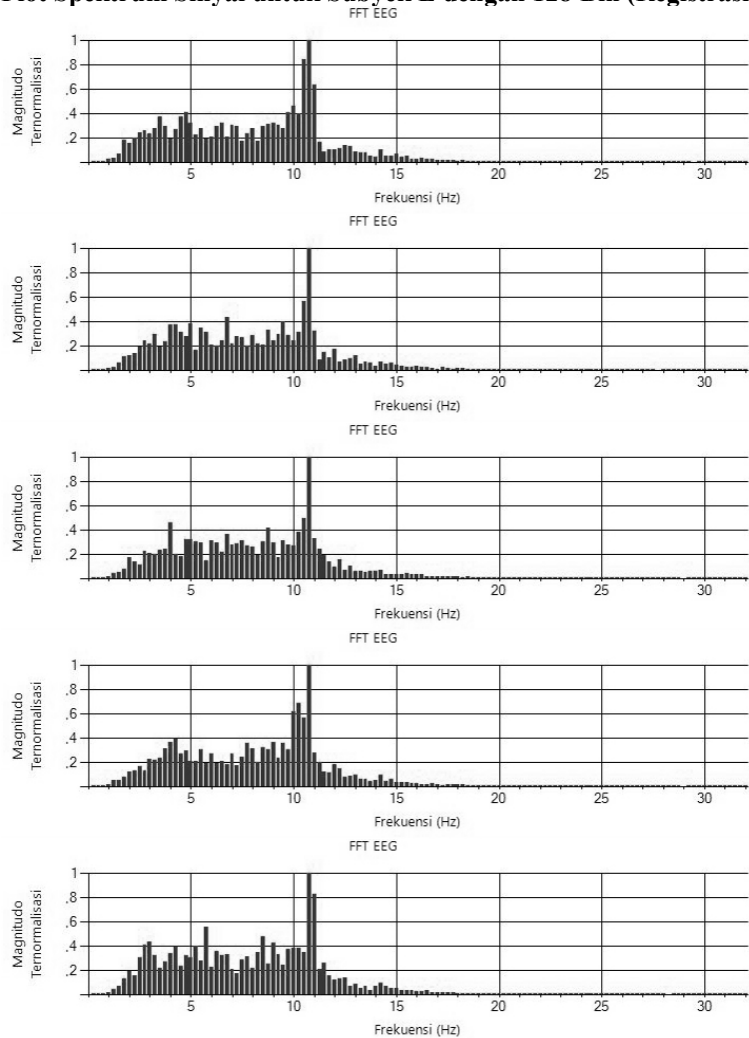
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 64 Bin (Registrasi)



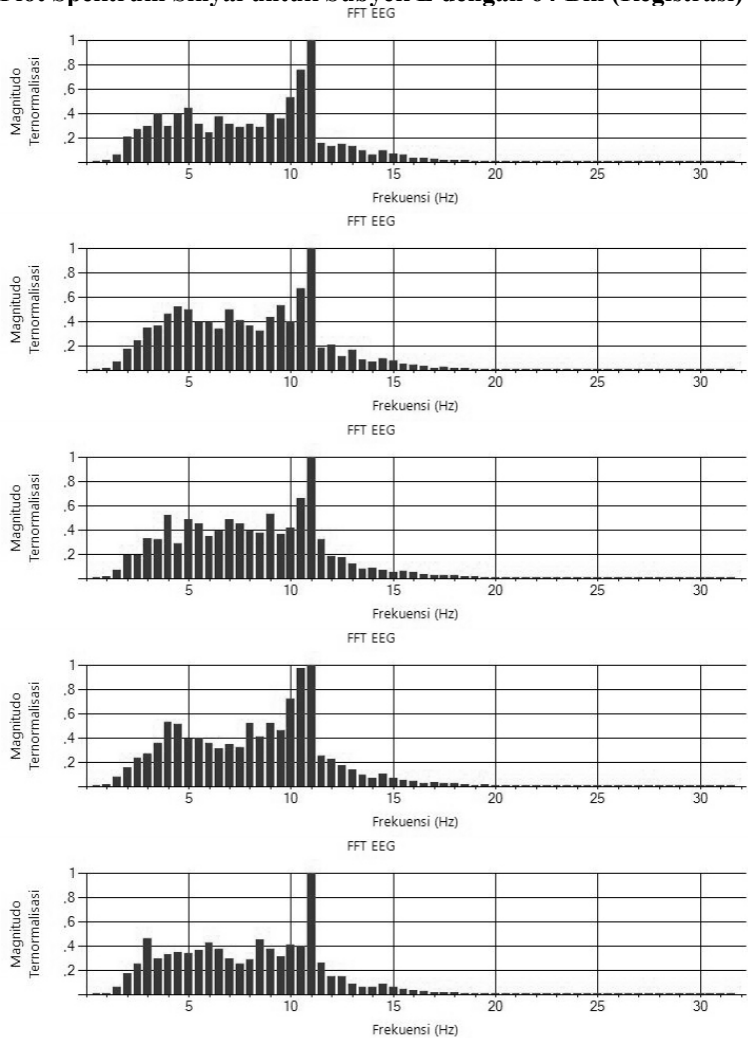
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 1.024 Bin (Registrasi)



Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 128 Bin (Registrasi)



Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 64 Bin (Registrasi)



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

Korelasi Silang Intra-kelas 1.024 Bin

| Korelasi Silang | A2 | A3 | A4 | A5 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | 0,718774419 | 0,729760121 | 0,76911104 | 0,626616027 |
| A2 | | 0,742557564 | 0,643070496 | 0,625892866 |
| A3 | | | 0,729861797 | 0,727989946 |
| A4 | | | | 0,650716739 |
| Korelasi Silang | B2 | B3 | B4 | B5 |
| B1 | 0,655596618 | 0,676023202 | 0,621565208 | 0,614150723 |
| B2 | | 0,818798246 | 0,67853062 | 0,671155918 |
| B3 | | | 0,738752193 | 0,680301281 |
| B4 | | | | 0,740536184 |
| Korelasi Silang | C2 | C3 | C4 | C5 |
| C1 | 0,76780478 | 0,679097622 | 0,713624493 | 0,64694261 |
| C2 | | 0,597477201 | 0,634767329 | 0,615135297 |
| C3 | | | 0,72952404 | 0,781248578 |
| C4 | | | | 0,695162922 |
| Korelasi Silang | D2 | D3 | D4 | D5 |
| D1 | 0,747714872 | 0,616930798 | 0,693640115 | 0,755363449 |
| D2 | | 0,747714872 | 0,688849751 | 0,728913851 |
| D3 | | | 0,659414767 | 0,680272197 |
| D4 | | | | 0,753661013 |
| Korelasi Silang | E2 | E3 | E4 | E5 |
| E1 | 0,655266905 | 0,748661525 | 0,665923927 | 0,65017812 |
| E2 | | 0,7070157 | 0,767388282 | 0,713661041 |
| E3 | | | 0,708416023 | 0,699168996 |
| E4 | | | | 0,715127321 |

Korelasi Silang Intra-kelas 128 Bin

| | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Korelasi Silang | A2 | A3 | A4 | A5 |
| A1 | 0,897387615 | 0,935913069 | 0,964159366 | 0,91440829 |
| A2 | | 0,938328432 | 0,879316612 | 0,866470241 |
| A3 | | | 0,93479129 | 0,890305593 |
| A4 | | | | 0,878788974 |
| Korelasi Silang | B2 | B3 | B4 | B5 |
| B1 | 0,924984487 | 0,917360428 | 0,862041926 | 0,83263791 |
| B2 | | 0,955660673 | 0,90682971 | 0,900312181 |
| B3 | | | 0,925650226 | 0,875359326 |
| B4 | | | | 0,908075895 |
| Korelasi Silang | C2 | C3 | C4 | C5 |
| C1 | 0,904906666 | 0,908229233 | 0,953515991 | 0,853063657 |
| C2 | | 0,775045437 | 0,835382145 | 0,764776111 |
| C3 | | | 0,950414627 | 0,924462111 |
| C4 | | | | 0,908419741 |
| Korelasi Silang | D2 | D3 | D4 | D5 |
| D1 | 0,916701121 | 0,841788988 | 0,902168198 | 0,94963028 |
| D2 | | 0,905451929 | 0,868949298 | 0,933419144 |
| D3 | | | 0,859661096 | 0,902152109 |
| D4 | | | | 0,91939731 |
| Korelasi Silang | E2 | E3 | E4 | E5 |
| E1 | 0,929792649 | 0,915578275 | 0,919967828 | 0,863543894 |
| E2 | | 0,954178329 | 0,918332068 | 0,892969221 |
| E3 | | | 0,926946848 | 0,894406851 |
| E4 | | | | 0,895430461 |

Korelasi Silang Intra-kelas 64 Bin

| Korelasi Silang | A2 | A3 | A4 | A5 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | 0,955259176 | 0,957967645 | 0,987123885 | 0,96660278 |
| A2 | | 0,969526028 | 0,948019037 | 0,909772574 |
| A3 | | | 0,960577704 | 0,92735515 |
| A4 | | | | 0,957054924 |
| Korelasi Silang | B2 | B3 | B4 | B5 |
| B1 | 0,945455865 | 0,946727509 | 0,926062896 | 0,86184397 |
| B2 | | 0,98646168 | 0,961693017 | 0,922808978 |
| B3 | | | 0,961150519 | 0,919642582 |
| B4 | | | | 0,948749503 |
| Korelasi Silang | C2 | C3 | C4 | C5 |
| C1 | 0,950889368 | 0,927642537 | 0,971272485 | 0,923271056 |
| C2 | | 0,830532342 | 0,910990856 | 0,818932465 |
| C3 | | | 0,967420641 | 0,9605868 |
| C4 | | | | 0,963930122 |
| Korelasi Silang | D2 | D3 | D4 | D5 |
| D1 | 0,957373339 | 0,897678455 | 0,93769585 | 0,966038053 |
| D2 | | 0,951239949 | 0,951198052 | 0,974109889 |
| D3 | | | 0,915422785 | 0,952852758 |
| D4 | | | | 0,948817933 |
| Korelasi Silang | E2 | E3 | E4 | E5 |
| E1 | 0,952481204 | 0,957609054 | 0,971182789 | 0,917160292 |
| E2 | | 0,975477015 | 0,956878479 | 0,954611511 |
| E3 | | | 0,968766183 | 0,951009676 |
| E4 | | | | 0,943942813 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C

Korelasi Silang Inter-kelas 1.024 Bin

| Korelasi Silang | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| B1 | 0,5441661 | 0,5205304 | 0,5880428 | 0,5816899 | 0,6237212 |
| B2 | 0,5201989 | 0,4805421 | 0,5661234 | 0,5192395 | 0,6334121 |
| B3 | 0,512504 | 0,4880756 | 0,5472193 | 0,5408585 | 0,6452843 |
| B4 | 0,5346042 | 0,5189307 | 0,5429411 | 0,5302919 | 0,6139137 |
| B5 | 0,523247 | 0,4890297 | 0,5027476 | 0,5078078 | 0,5864471 |
| C1 | 0,4831181 | 0,4471286 | 0,5496452 | 0,5385828 | 0,6068483 |
| C2 | 0,4923404 | 0,421914 | 0,4893958 | 0,4831921 | 0,579795 |
| C3 | 0,5451731 | 0,4862934 | 0,5010425 | 0,5372421 | 0,5162102 |
| C4 | 0,4716218 | 0,4351017 | 0,4099418 | 0,452228 | 0,4806339 |
| C5 | 0,4831181 | 0,3923944 | 0,4179809 | 0,474509 | 0,4518648 |
| D1 | 0,4621388 | 0,4679755 | 0,4513015 | 0,4546216 | 0,5006689 |
| D2 | 0,5647679 | 0,5531462 | 0,5428471 | 0,546739 | 0,5555848 |
| D3 | 0,5598499 | 0,5377639 | 0,5117502 | 0,5300743 | 0,5780487 |
| D4 | 0,5845692 | 0,5503547 | 0,5710941 | 0,5497887 | 0,6042287 |
| D5 | 0,5284104 | 0,5220995 | 0,5204541 | 0,5145306 | 0,5223263 |
| E1 | 0,4904104 | 0,4489837 | 0,5083252 | 0,4821216 | 0,5445333 |
| E2 | 0,4896516 | 0,5023004 | 0,4993732 | 0,5456355 | 0,51.0240 9 |
| E3 | 0,4979051 | 0,5135152 | 0,5102157 | 0,4942927 | 0,5059162 |
| E4 | 0,472319 | 0,463475 | 0,4480141 | 0,4579174 | 0,4740393 |
| E5 | 0,5058654 | 0,4946778 | 0,4987541 | 0,5212059 | 0,5581628 |
| Korelasi Silang | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
| C1 | 0,5796976 | 0,7990476 | 0,7723691 | 0,730277 | 0,716857 |
| C2 | 0,6497624 | 0,762339 | 0,7616045 | 0,5920731 | 0,7248826 |
| C3 | 0,5013773 | 0,6061505 | 0,5556642 | 0,6105275 | 0,6453437 |

| | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C4 | 0,5605288 | 0,5920731 | 0,6085897 | 0,7073505 | 0,7494414 |
| C5 | 0,4813618 | 0,518088 | 0,515446 | 0,5415096 | 0,6278957 |
| D1 | 0,4549521 | 0,4976358 | 0,5240173 | 0,4782554 | 0,4995035 |
| D2 | 0,5373645 | 0,5834062 | 0,6068386 | 0,6067244 | 0,6138241 |
| D3 | 0,565595 | 0,6232824 | 0,6075713 | 0,5300743 | 0,7310314 |
| D4 | 0,5107288 | 0,5954359 | 0,5956881 | 0,5044819 | 0,5308386 |
| D5 | 0,5110543 | 0,5480125 | 0,5797938 | 0,5345247 | 0,5883253 |
| E1 | 0,4937006 | 0,6176009 | 0,6159173 | 0,6118343 | 0,6599605 |
| E2 | 0,4962179 | 0,5032232 | 0,5353373 | 0,4882829 | 0,5025584 |
| E3 | 0,4960174 | 0,4940183 | 0,5149796 | 0,469365 | 0,5107647 |
| E4 | 0,4974572 | 0,5196106 | 0,5540593 | 0,5037649 | 0,5341596 |
| E5 | 0,4868679 | 0,4988528 | 0,5218937 | 0,5037361 | 0,526636 |
| Korelasi Silang | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| D1 | 0,5540983 | 0,4957265 | 0,4959122 | 0,4759018 | 0,4933671 |
| D2 | 0,6505454 | 0,5950494 | 0,5739776 | 0,60762 | 0,5609872 |
| D3 | 0,674604 | 0,6504009 | 0,6873512 | 0,7140823 | 0,6589155 |
| D4 | 0,5746073 | 0,6017599 | 0,5634524 | 0,5125911 | 0,5439616 |
| D5 | 0,6156088 | 0,6379458 | 0,6163348 | 0,5350483 | 0,6658293 |
| E1 | 0,6701785 | 0,6542824 | 0,6087132 | 0,6420167 | 0,5622442 |
| E2 | 0,5570817 | 0,5166453 | 0,5966673 | 0,5336665 | 0,5695833 |
| E3 | 0,5206587 | 0,5156588 | 0,5100149 | 0,5114487 | 0,4948658 |
| E4 | 0,5450149 | 0,577152 | 0,5800063 | 0,4985423 | 0,5480189 |
| E5 | 0,5326202 | 0,5076531 | 0,5184818 | 0,4796075 | 0,4779117 |
| Korelasi Silang | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 |
| E1 | 0,5686865 | 0,661001 | 0,6767051 | 0,7146448 | 0,6719612 |
| E2 | 0,5881073 | 0,558781 | 0,5950382 | 0,7153593 | 0,6536241 |
| E3 | 0,6767051 | 0,6114671 | 0,5857865 | 0,7212302 | 0,6471694 |
| E4 | 0,5872715 | 0,6215202 | 0,5872715 | 0,7311871 | 0,721829 |

| | | | | | |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| E5 | 0,6518508 | 0,6626437 | 0,6158322 | 0,721829 | 0,6583531 |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|

Korelasi Silang Inter-kelas 128 Bin

| Korelasi Silang | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| B1 | 0,777477 | 0,730333 | 0,754315 | 0,753693 | 0,810839 |
| B2 | 0,702534 | 0,62899 | 0,671623 | 0,663569 | 0,782823 |
| B3 | 0,704881 | 0,643401 | 0,67967 | 0,679208 | 0,778439 |
| B4 | 0,726471 | 0,655221 | 0,69499 | 0,684415 | 0,666252 |
| B5 | 0,694733 | 0,653937 | 0,653937 | 0,666252 | 0,766787 |
| C1 | 0,680933 | 0,557552 | 0,629253 | 0,66414 | 0,729709 |
| C2 | 0,63831 | 0,553942 | 0,59894 | 0,600949 | 0,724917 |
| C3 | 0,721099 | 0,63738 | 0,646221 | 0,695886 | 0,711292 |
| C4 | 0,607473 | 0,543561 | 0,576307 | 0,607473 | 0,667776 |
| C5 | 0,643221 | 0,549569 | 0,556475 | 0,589972 | 0,618742 |
| D1 | 0,633125 | 0,587151 | 0,574186 | 0,614822 | 0,633848 |
| D2 | 0,730432 | 0,679276 | 0,664169 | 0,704589 | 0,724089 |
| D3 | 0,748416 | 0,684062 | 0,633125 | 0,729303 | 0,771424 |
| D4 | 0,729724 | 0,704494 | 0,681983 | 0,712094 | 0,731027 |
| D5 | 0,676718 | 0,654445 | 0,640072 | 0,653041 | 0,676339 |
| E1 | 0,662147 | 0,614278 | 0,617285 | 0,641965 | 0,715483 |
| E2 | 0,680963 | 0,677435 | 0,644249 | 0,685806 | 0,681909 |
| E3 | 0,670709 | 0,658507 | 0,644249 | 0,655864 | 0,632765 |
| E4 | 0,628333 | 0,603847 | 0,567341 | 0,590842 | 0,631158 |
| E5 | 0,656579 | 0,650719 | 0,611776 | 0,631303 | 0,679913 |
| Korelasi Silang | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
| C1 | 0,813454 | 0,902832 | 0,884809 | 0,903411 | 0,919297 |
| C2 | 0,879047 | 0,921672 | 0,923464 | 0,894941 | 0,878546 |
| C3 | 0,694785 | 0,79546 | 0,7712 | 0,810217 | 0,902145 |
| C4 | 0,744264 | 0,857557 | 0,829741 | 0,849846 | 0,928397 |

| | | | | | |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| C5 | 0,647351 | 0,730439 | 0,701266 | 0,719295 | 0,854822 |
| D1 | 0,610093 | 0,646977 | 0,654242 | 0,632294 | 0,670549 |
| D2 | 0,726305 | 0,753295 | 0,737921 | 0,704589 | 0,784605 |
| D3 | 0,781179 | 0,845642 | 0,815305 | 0,835213 | 0,909606 |
| D4 | 0,683159 | 0,708958 | 0,716518 | 0,679476 | 0,719327 |
| D5 | 0,673324 | 0,715287 | 0,716179 | 0,692309 | 0,764044 |
| E1 | 0,706809 | 0,783172 | 0,781098 | 0,773093 | 0,816605 |
| E2 | 0,642562 | 0,67279 | 0,680375 | 0,633826 | 0,686461 |
| E3 | 0,64545 | 0,654881 | 0,666078 | 0,612232 | 0,668542 |
| E4 | 0,630661 | 0,688929 | 0,709447 | 0,655378 | 0,71982 |
| E5 | 0,632613 | 0,6544 | 0,65502 | 0,629011 | 0,682889 |
| Korelasi Silang | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| D1 | 0,663882 | 0,687605 | 0,69889 | 0,642661 | 0,694415 |
| D2 | 0,777172 | 0,749954 | 0,789092 | 0,769797 | 0,770341 |
| D3 | 0,910859 | 0,840518 | 0,928297 | 0,908358 | 0,897506 |
| D4 | 0,683656 | 0,710033 | 0,712228 | 0,660056 | 0,703037 |
| D5 | 0,748818 | 0,766389 | 0,788404 | 0,737817 | 0,805037 |
| E1 | 0,827527 | 0,797323 | 0,817228 | 0,803405 | 0,78023 |
| E2 | 0,690355 | 0,672185 | 0,738631 | 0,670196 | 0,705468 |
| E3 | 0,65928 | 0,661088 | 0,699749 | 0,642899 | 0,695747 |
| E4 | 0,697652 | 0,73791 | 0,736548 | 0,686274 | 0,752669 |
| E5 | 0,631919 | 0,632845 | 0,68248 | 0,62987 | 0,656392 |
| Korelasi Silang | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 |
| E1 | 0,776315 | 0,795902 | 0,889977 | 0,87955 | 0,845392 |
| E2 | 0,780257 | 0,765418 | 0,829358 | 0,909066 | 0,846013 |
| E3 | 0,73566 | 0,740604 | 0,79111 | 0,892984 | 0,823366 |
| E4 | 0,79082 | 0,795227 | 0,828015 | 0,905637 | 0,867167 |
| E5 | 0,797815 | 0,843542 | 0,800686 | 0,898211 | 0,832089 |

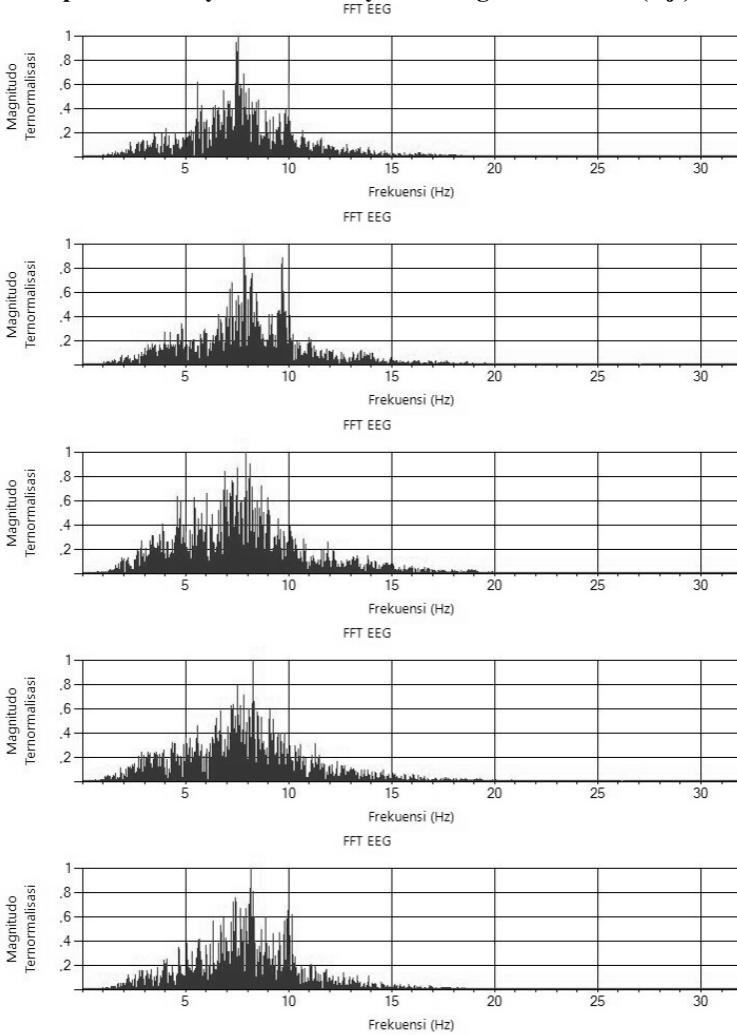
Korelasi Silang Inter-kelas 64 Bin

| Korelasi Silang | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| B1 | 0,800046 | 0,765039 | 0,78147 | 0,775214 | 0,845883 |
| B2 | 0,736038 | 0,676723 | 0,709804 | 0,711154 | 0,794912 |
| B3 | 0,75324 | 0,693527 | 0,720475 | 0,731577 | 0,799485 |
| B4 | 0,831399 | 0,746083 | 0,771324 | 0,807339 | 0,865584 |
| B5 | 0,759751 | 0,685643 | 0,703104 | 0,731556 | 0,799984 |
| C1 | 0,734829 | 0,633972 | 0,674767 | 0,712149 | 0,761023 |
| C2 | 0,673882 | 0,588512 | 0,61946 | 0,64439 | 0,73779 |
| C3 | 0,762329 | 0,675533 | 0,676342 | 0,735427 | 0,745414 |
| C4 | 0,6982 | 0,601956 | 0,618899 | 0,663264 | 0,701123 |
| C5 | 0,651515 | 0,566866 | 0,567002 | 0,619741 | 0,651062 |
| D1 | 0,661969 | 0,622107 | 0,594452 | 0,651832 | 0,657487 |
| D2 | 0,763891 | 0,708124 | 0,696401 | 0,751718 | 0,765542 |
| D3 | 0,786385 | 0,721939 | 0,708703 | 0,767443 | 0,792079 |
| D4 | 0,758269 | 0,756596 | 0,707074 | 0,751254 | 0,759868 |
| D5 | 0,704356 | 0,669149 | 0,655079 | 0,690629 | 0,704479 |
| E1 | 0,731719 | 0,683813 | 0,65686 | 0,710225 | 0,746287 |
| E2 | 0,743413 | 0,752399 | 0,691412 | 0,736262 | 0,734614 |
| E3 | 0,72726 | 0,746892 | 0,692342 | 0,713122 | 0,704544 |
| E4 | 0,663012 | 0,649595 | 0,597821 | 0,647666 | 0,662971 |
| E5 | 0,687062 | 0,689761 | 0,630717 | 0,677546 | 0,693145 |
| Korelasi Silang | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
| C1 | 0,844916 | 0,918841 | 0,912806 | 0,940606 | 0,948309 |
| C2 | 0,904864 | 0,956132 | 0,946614 | 0,936446 | 0,933226 |
| C3 | 0,722315 | 0,81052 | 0,81287 | 0,887103 | 0,931482 |
| C4 | 0,783272 | 0,872498 | 0,874123 | 0,910376 | 0,955188 |

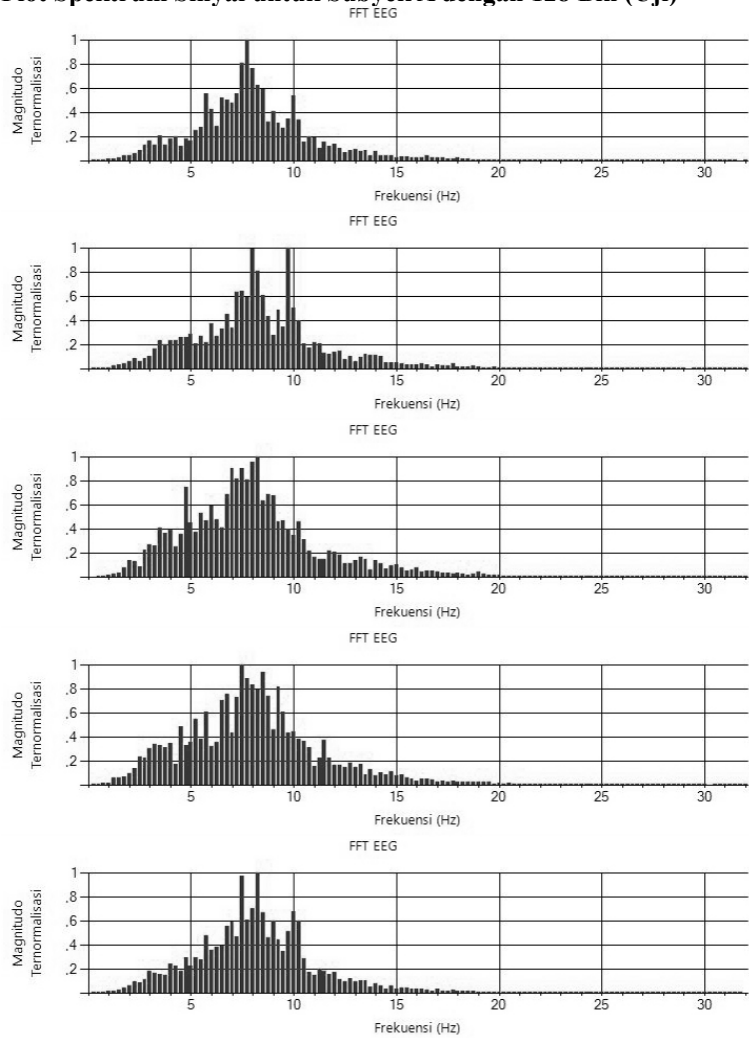
| | | | | | |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| C5 | 0,671167 | 0,761304 | 0,760193 | 0,823836 | 0,910706 |
| D1 | 0,640089 | 0,694161 | 0,682435 | 0,687633 | 0,739135 |
| D2 | 0,751125 | 0,793014 | 0,785487 | 0,802261 | 0,827965 |
| D3 | 0,794749 | 0,853985 | 0,84789 | 0,888745 | 0,927238 |
| D4 | 0,711295 | 0,749475 | 0,752804 | 0,751945 | 0,796988 |
| D5 | 0,694844 | 0,762524 | 0,749964 | 0,762354 | 0,8332 |
| E1 | 0,751491 | 0,826356 | 0,815466 | 0,835836 | 0,887147 |
| E2 | 0,693354 | 0,730576 | 0,735136 | 0,750786 | 0,791944 |
| E3 | 0,702778 | 0,739739 | 0,740719 | 0,75101 | 0,806242 |
| E4 | 0,682406 | 0,755034 | 0,761175 | 0,761433 | 0,831344 |
| E5 | 0,663757 | 0,685932 | 0,698561 | 0,694417 | 0,744743 |
| Korelasi Silang | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| D1 | 0,730264 | 0,707371 | 0,763522 | 0,738288 | 0,741066 |
| D2 | 0,842311 | 0,956132 | 0,832449 | 0,819962 | 0,799759 |
| D3 | 0,926481 | 0,874677 | 0,942723 | 0,931995 | 0,925974 |
| D4 | 0,747869 | 0,719498 | 0,791965 | 0,753704 | 0,751793 |
| D5 | 0,829586 | 0,786428 | 0,852865 | 0,834422 | 0,842413 |
| E1 | 0,874102 | 0,818904 | 0,89603 | 0,877593 | 0,865564 |
| E2 | 0,763182 | 0,698487 | 0,827792 | 0,768336 | 0,781735 |
| E3 | 0,75974 | 0,701397 | 0,818781 | 0,775209 | 0,772013 |
| E4 | 0,800556 | 0,757741 | 0,840057 | 0,81575 | 0,813615 |
| E5 | 0,685433 | 0,657978 | 0,739032 | 0,686233 | 0,680789 |
| Korelasi Silang | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 |
| E1 | 0,861545 | 0,934887 | 0,954474 | 0,924953 | 0,926941 |
| E2 | 0,867085 | 0,91332 | 0,906243 | 0,948966 | 0,916279 |
| E3 | 0,830751 | 0,894754 | 0,889146 | 0,932697 | 0,893528 |
| E4 | 0,831983 | 0,904522 | 0,913195 | 0,921122 | 0,904864 |
| E5 | 0,839985 | 0,896855 | 0,845648 | 0,92918 | 0,867775 |

LAMPIRAN D

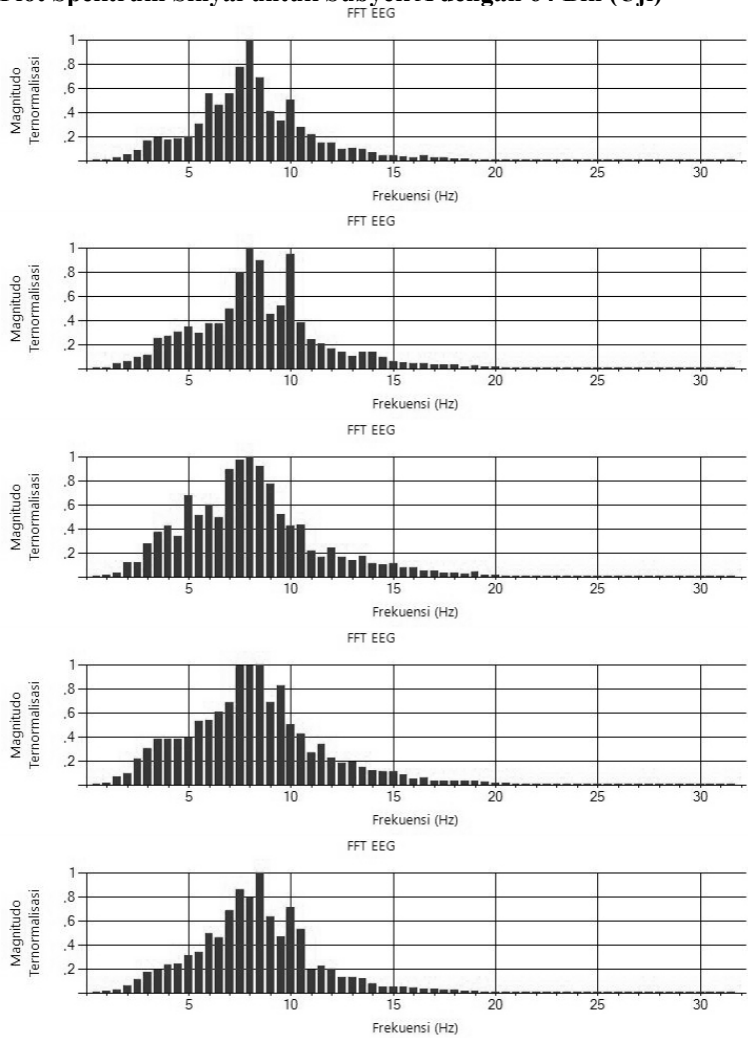
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 1.024 Bin (Uji)



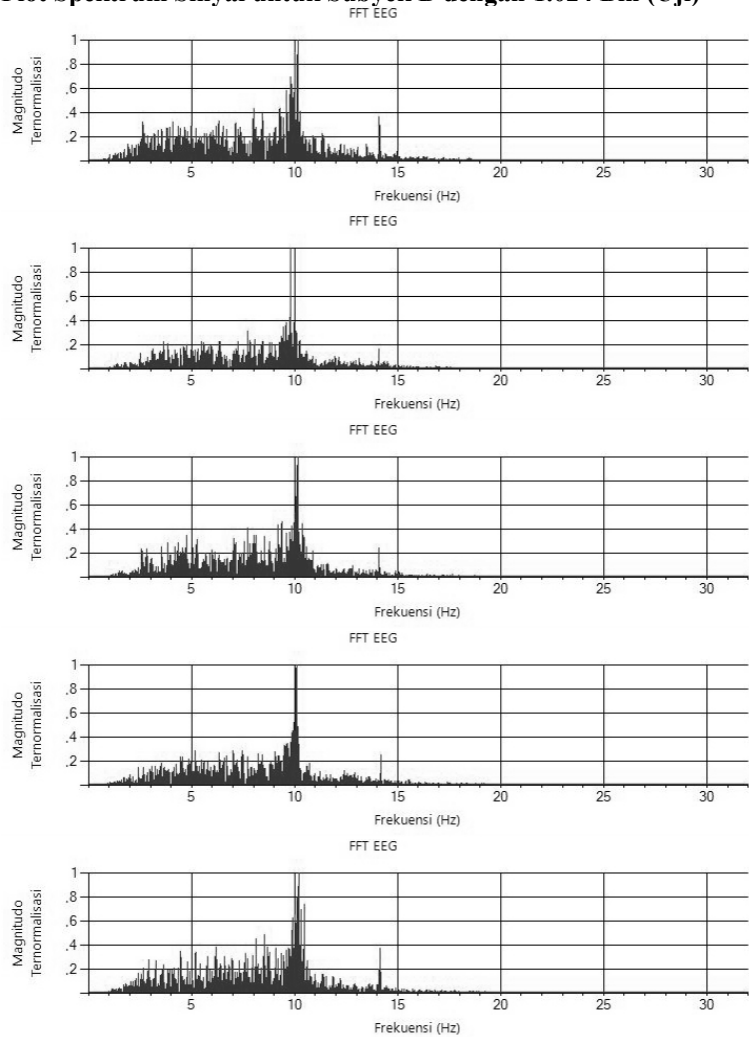
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 128 Bin (Uji)



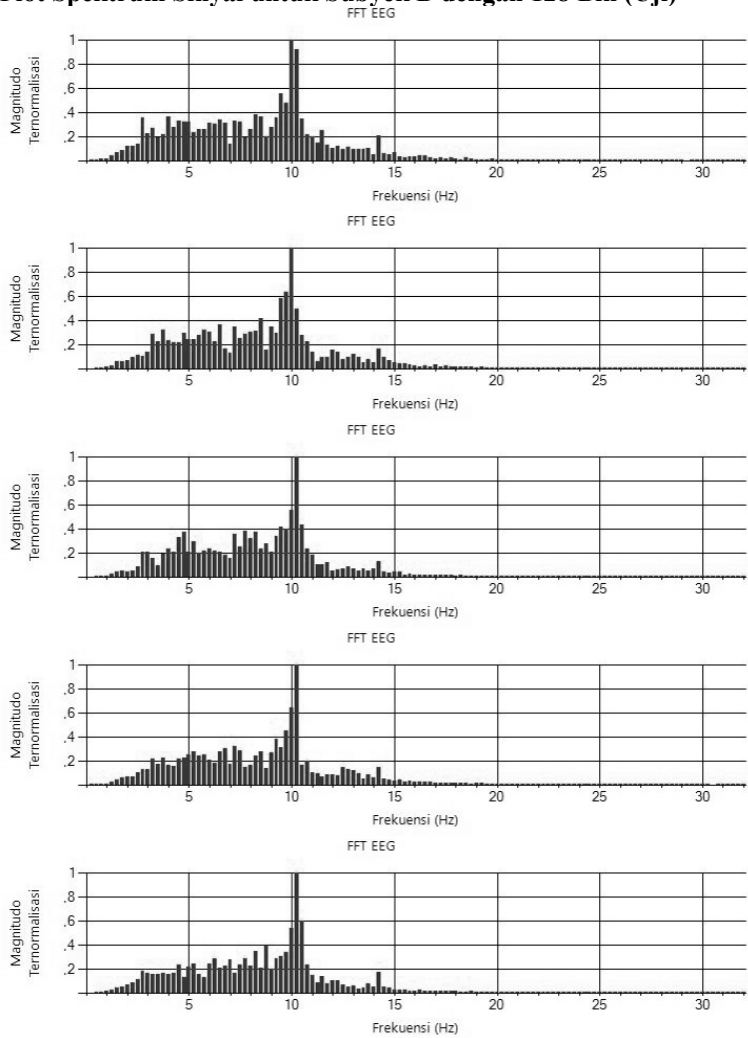
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek A dengan 64 Bin (Uji)



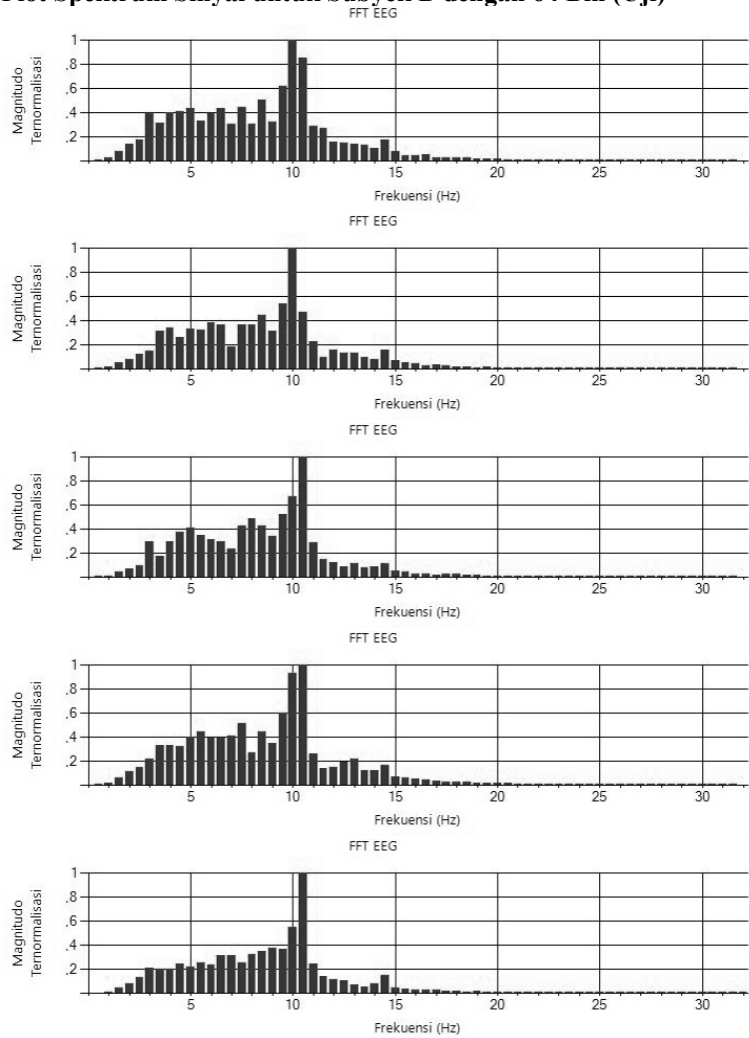
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 1.024 Bin (Uji)



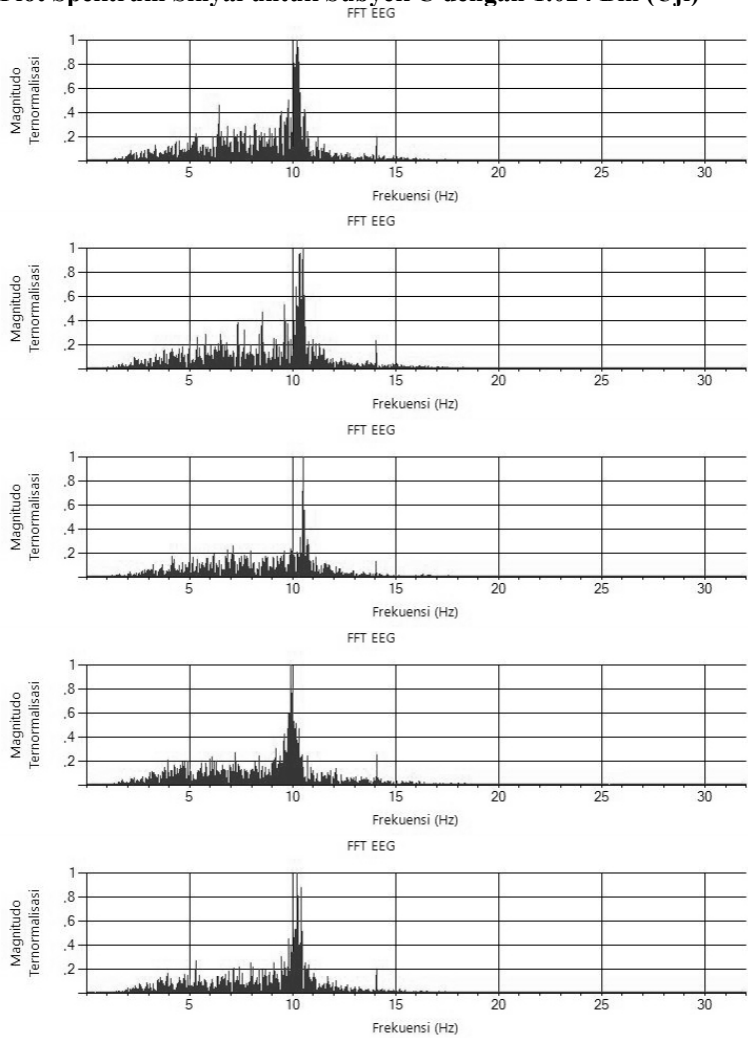
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 128 Bin (Uji)



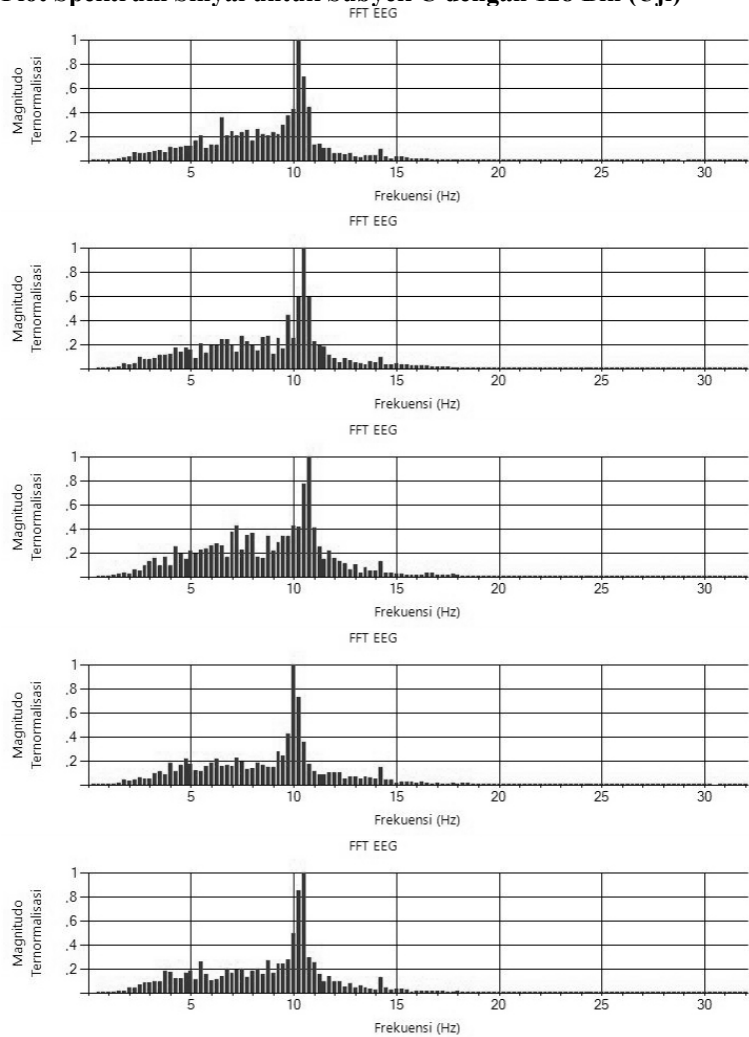
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek B dengan 64 Bin (Uji)



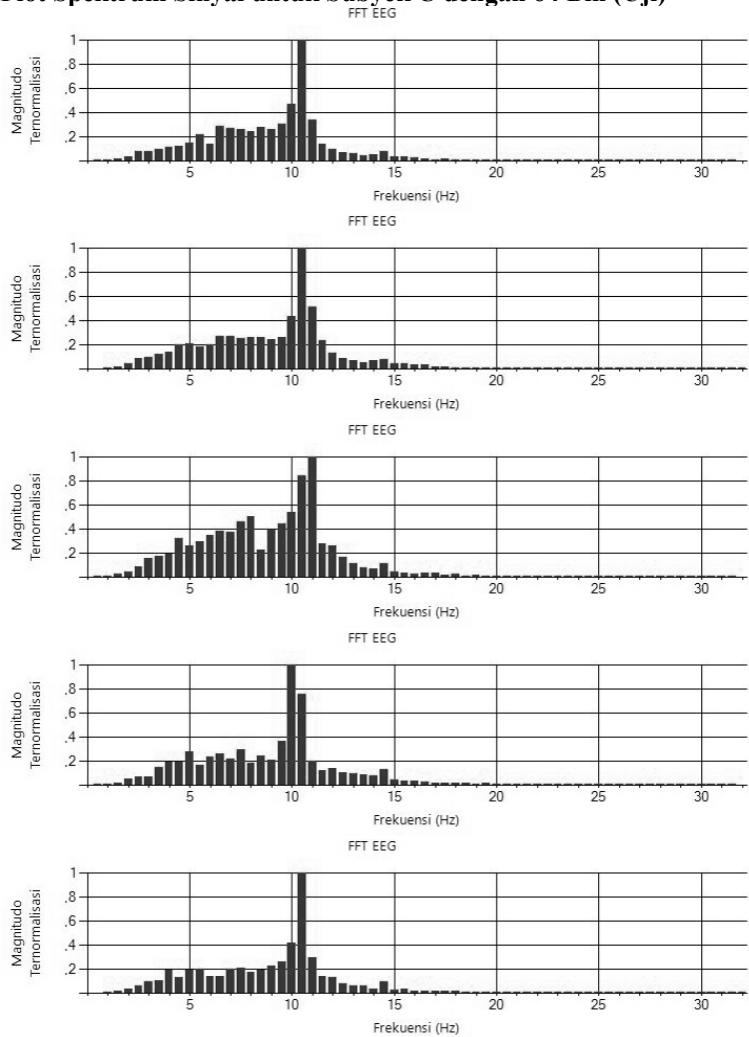
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 1.024 Bin (Uji)



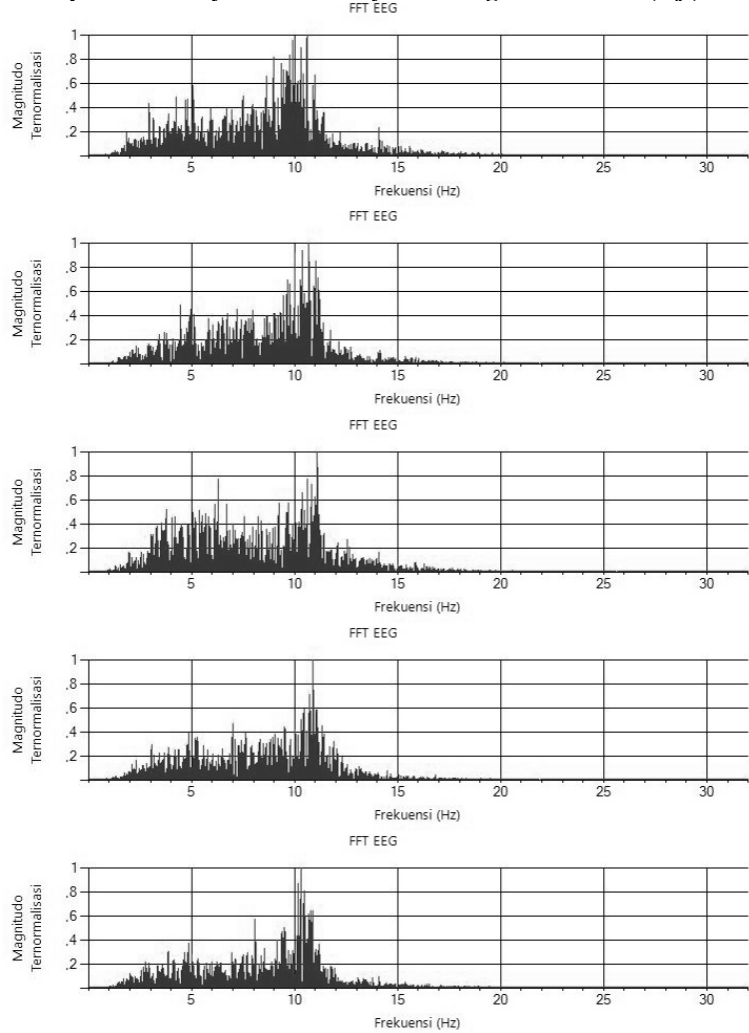
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 128 Bin (Uji)



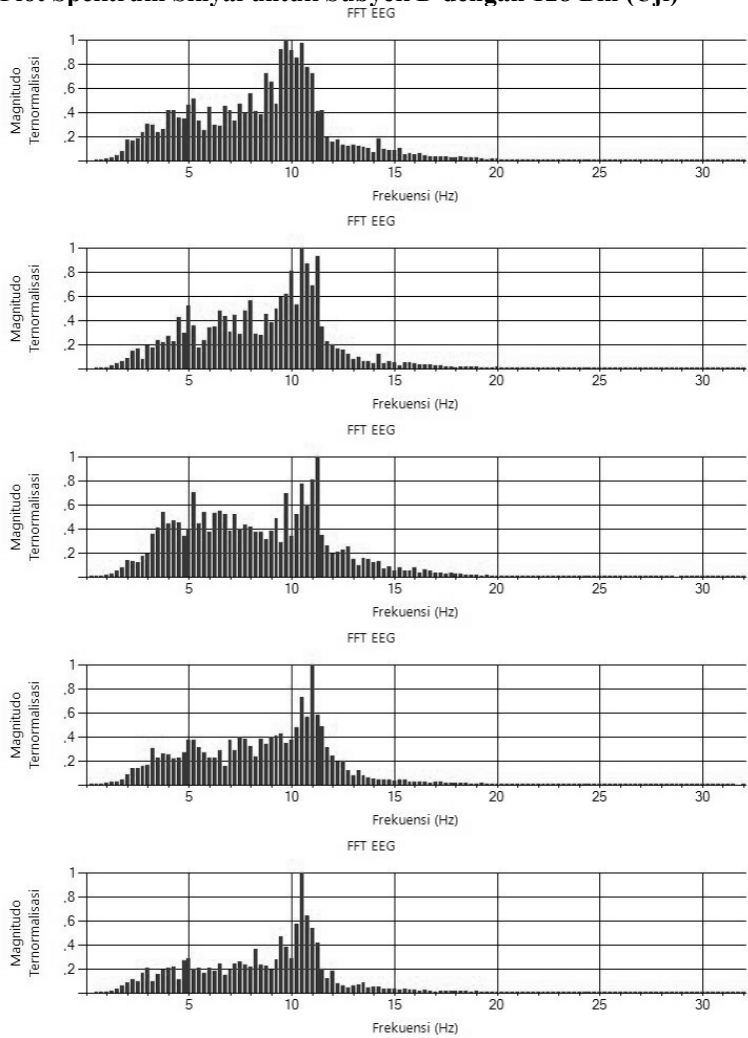
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek C dengan 64 Bin (Uji)



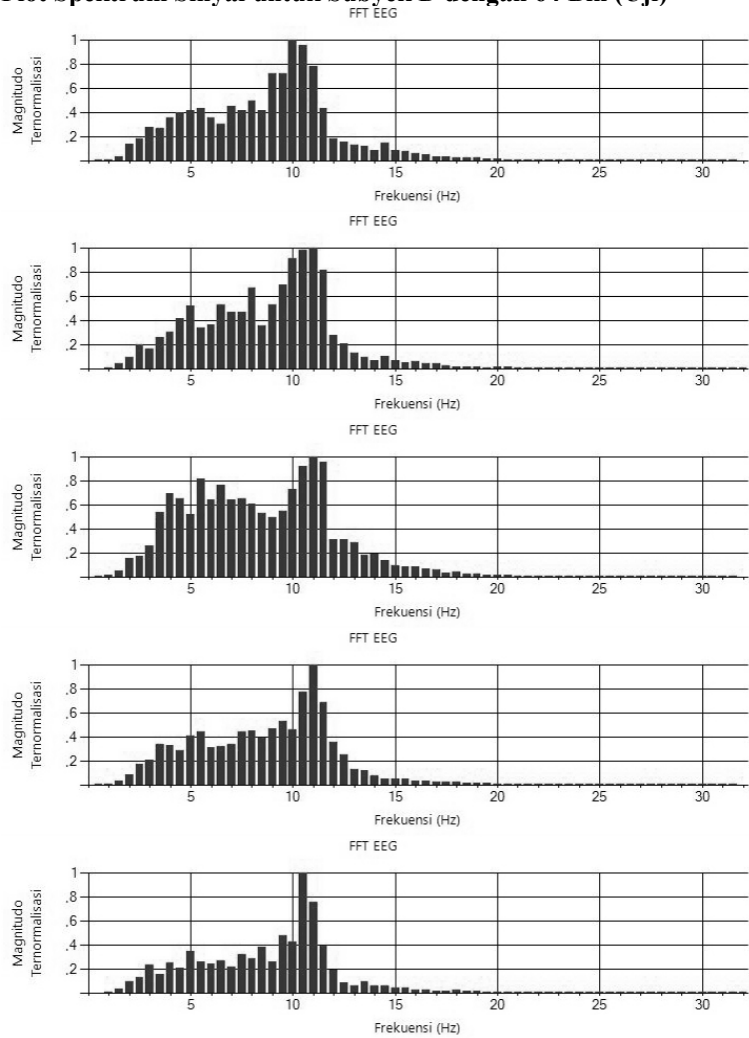
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 1.024 Bin (Uji)



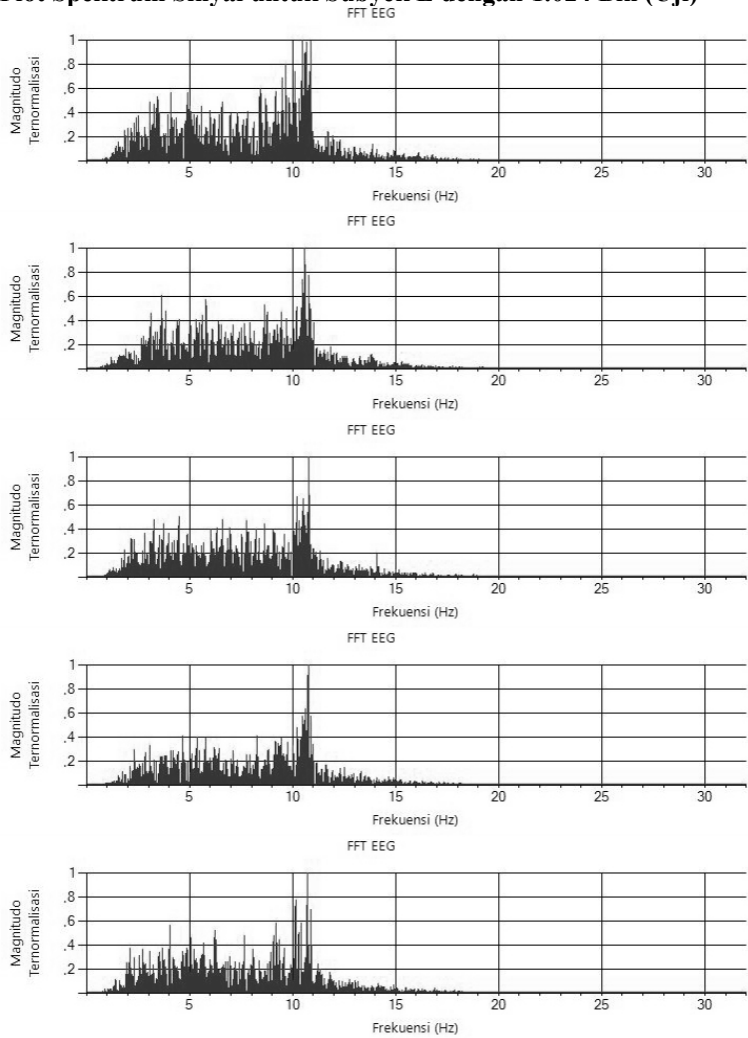
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 128 Bin (Uji)



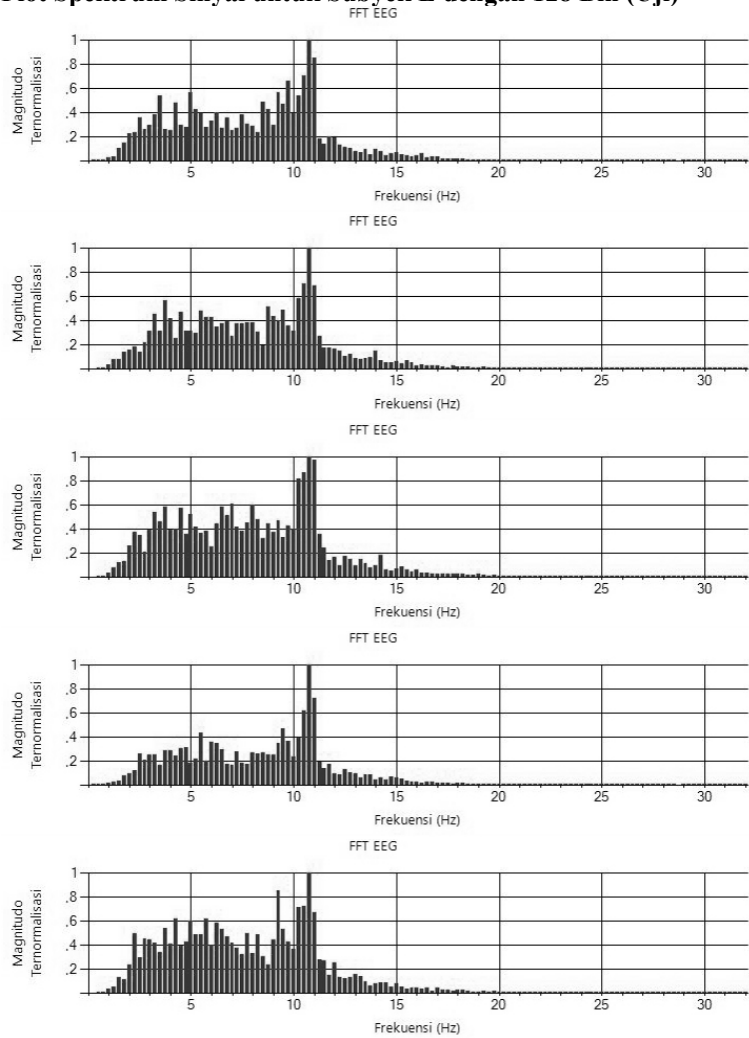
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek D dengan 64 Bin (Uji)



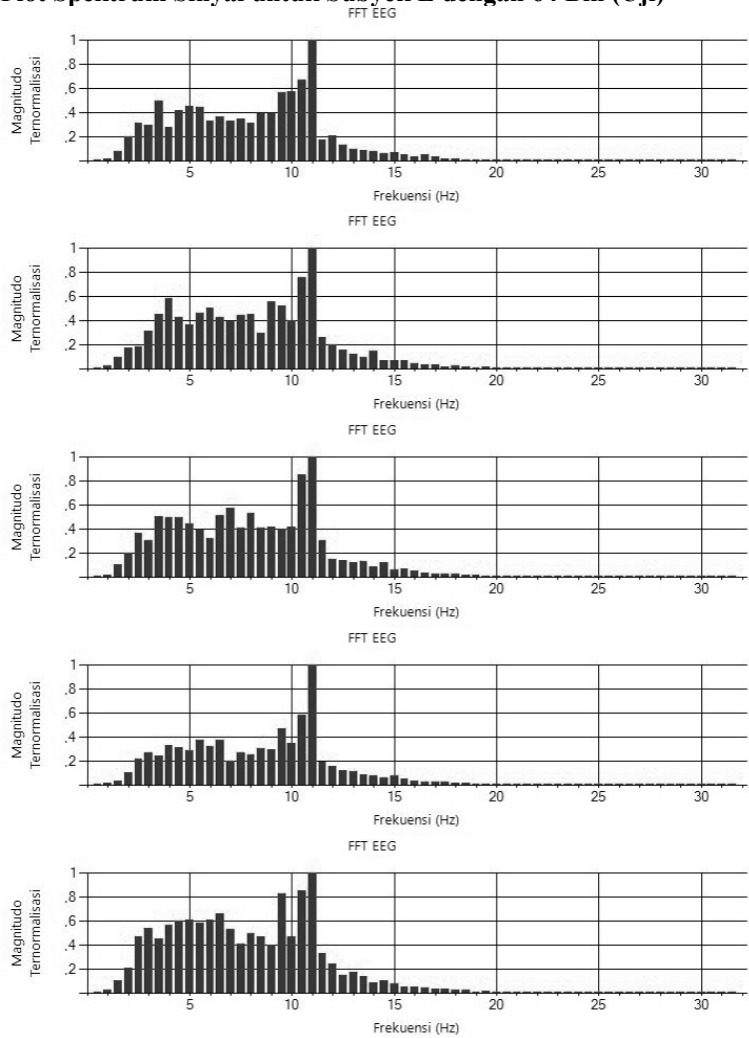
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 1.024 Bin (Uji)



Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 128 Bin (Uji)



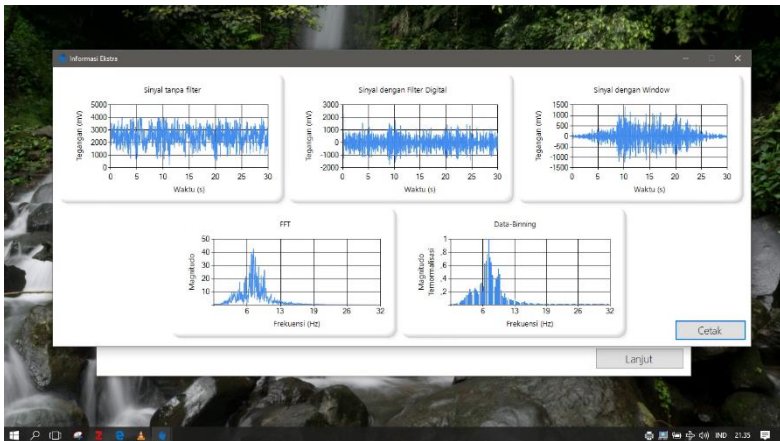
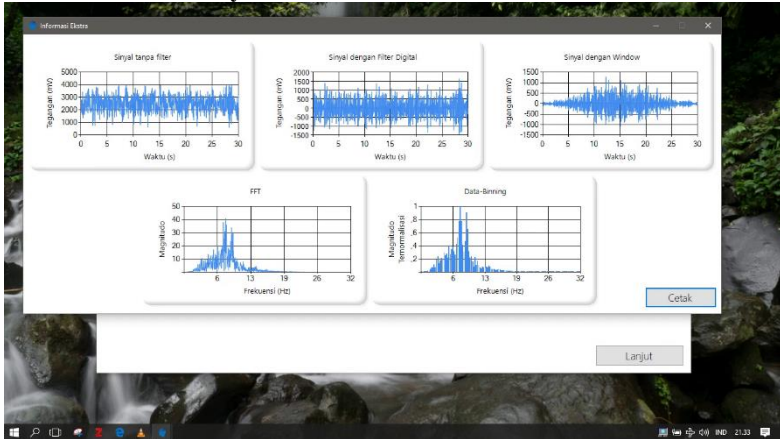
Plot Spektrum Sinyal untuk Subyek E dengan 64 Bin (Uji)

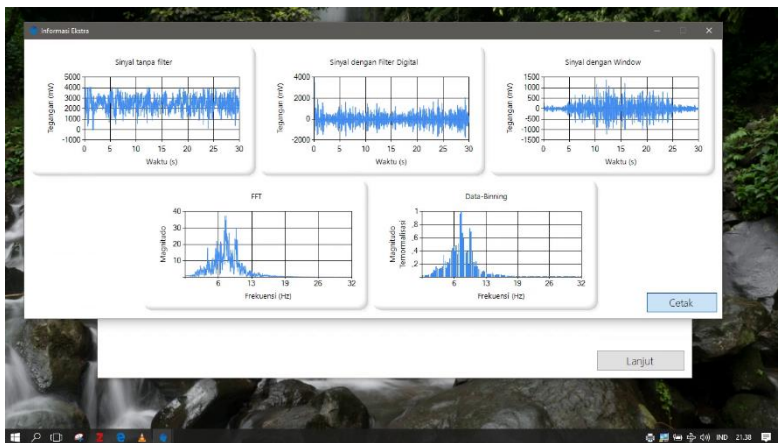
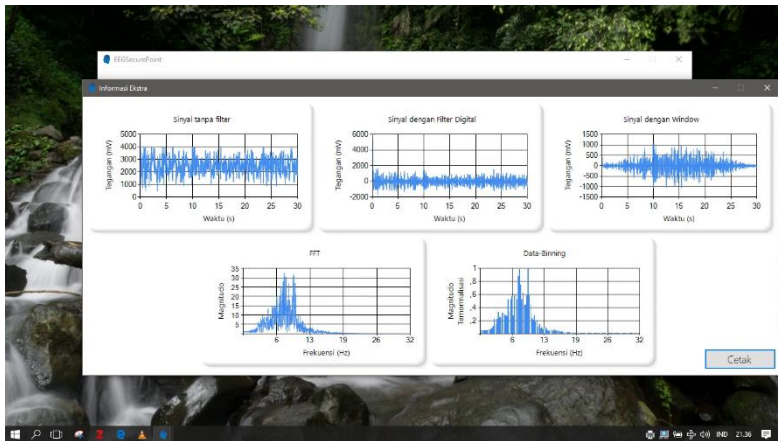


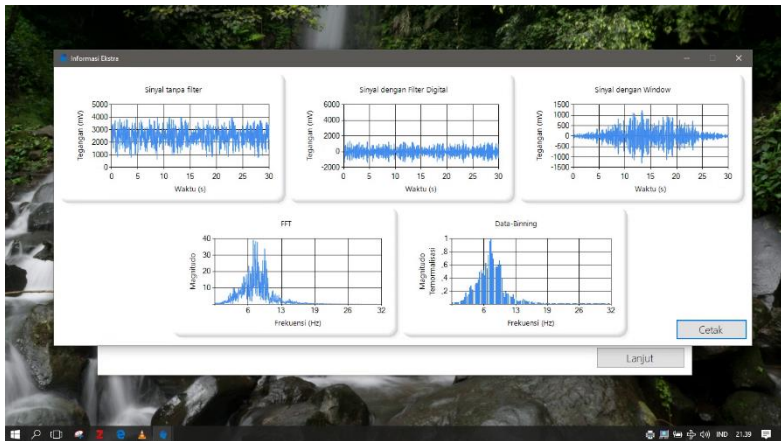
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN E

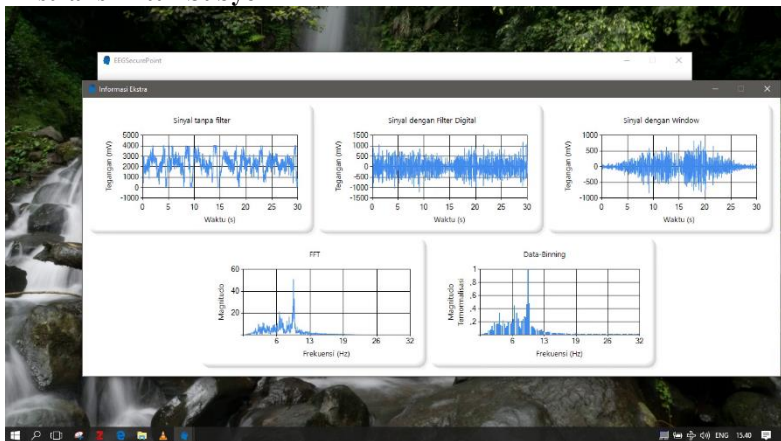
Ekstraksi Fitur Subyek A

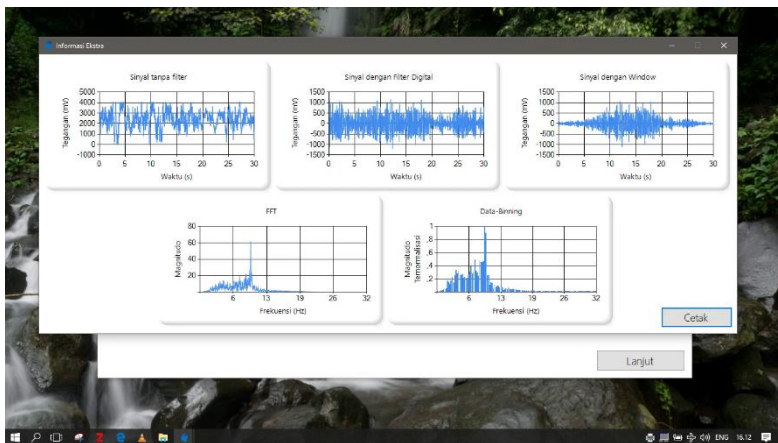
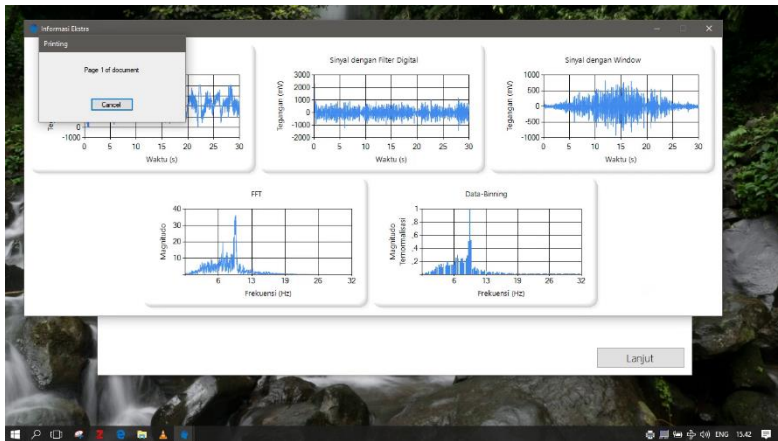


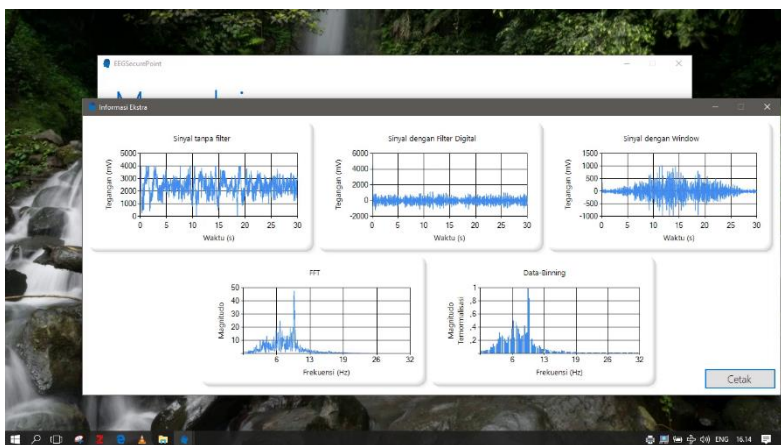
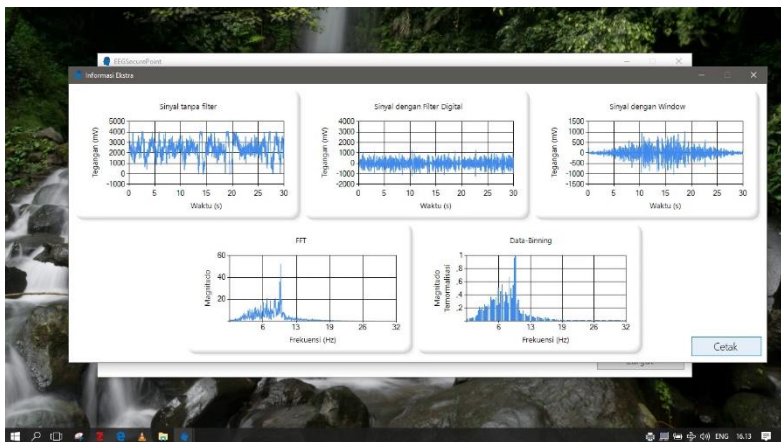




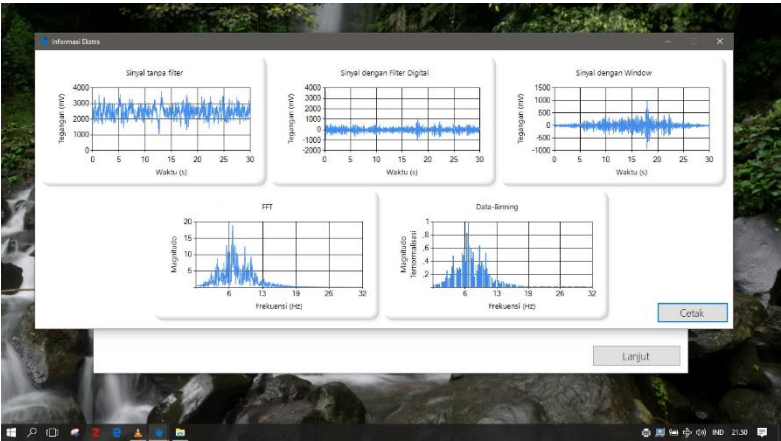
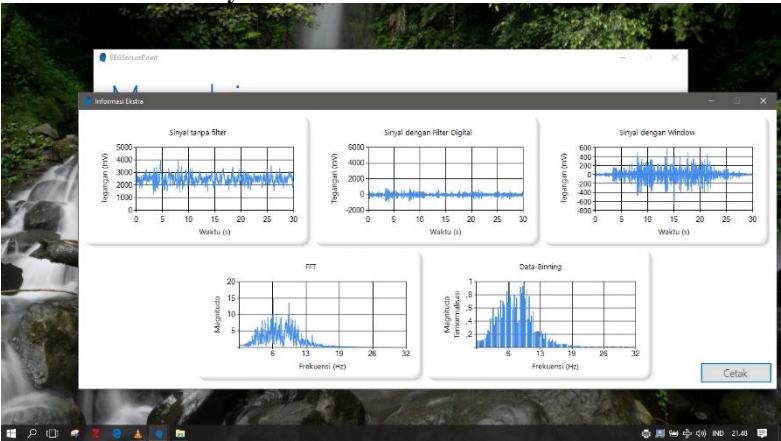
Ekstraksi Fitur Subyek B

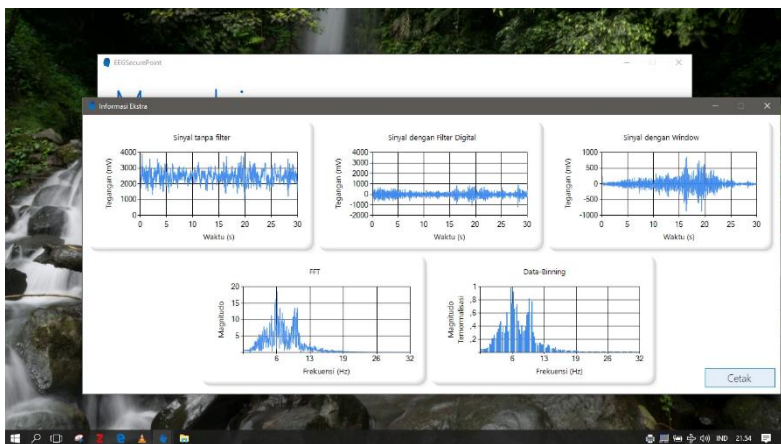
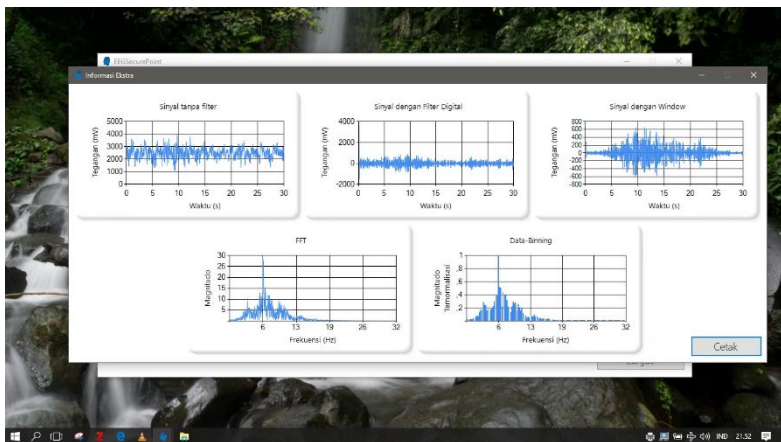


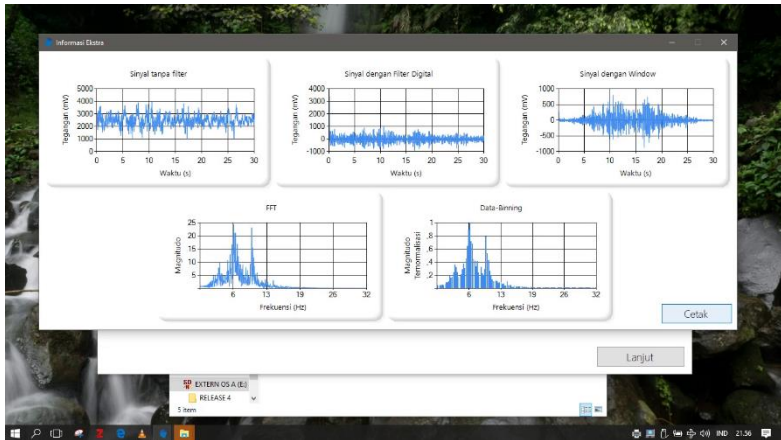




Ekstraksi Fitur Subyek C







BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Malang pada 14 September 1996. Penulis menjalankan studi Strata-I di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2014. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai anggota UKM Fotografi ITS periode 2014-2017, dan ketua Keanggotaan dan Pengembangan UKM Fotografi ITS periode 2016-2017. Penulis juga mengikuti kepanitiaan Young Engineers & Scientist Summit 2015 ASEAN, panitia Natal dan Paskah 2015,

koordinator seminar Fotografi Expo 2016, dan lain-lain. Pada tahun 2017, penulis menjadi *visiting researcher* di C-tech Labs Edwar Technology dan juga wakil koordinator praktikum di Laboratorium B202 Elektronika Dasar. Pada masa akhir studi di 2018, penulis menjadi peneliti di Laboratorium B402 Elektronika Industri.

E-mail : jefflgaol@icloud.com
Whatsapp : 081359151248
Instagram : @jefflgaol
Facebook : Jeff L Gaol
Line : jefflgaol
LinkedIn : Jeff L Gaol

Halaman ini sengaja dikosongkan